

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(рівень вищої освіти)

на тему Розроблення алгоритму енергозберігаючого управління індукторним динамічним електроприводом подвійного живлення

Виконав: студент 2 курсу, групи 601МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Щербінін Д.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кислиця С.Г.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2026 рік

РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи на тему

«Розроблення алгоритму енергозберігаючого управління індукторним динамічним електроприводом подвійного живлення»

Робота містить 75 сторінок, 17 рисунків, 1 таблицю, 24 використані джерела.

Ключові слова: система керування електроприводом, індукторний двигун подвійного живлення, електропривод, середовище LabVIEW.

Об'єктом кваліфікаційної роботи магістранта є розроблення електроприводу з індукторним двигуном подвійного живлення, який розглядається як складна електромеханічна система для автоматизованого керування.

Предметом кваліфікаційної роботи магістранта є алгоритми та методи енергозберігаючого керування індукторним двигуном подвійного живлення, а також математичні моделі та програмно-апаратні засоби, що застосовуються для реалізації системи керування електроприводом у режимі реального часу.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка інтелектуальної системи керування електроприводом, яка базується на математичному моделюванні в режимі реального часу.

У межах виконаної роботи здійснюється комплексна розробка, яка включає створення детальної математичної моделі індукторного двигуна подвійного живлення, побудову програмно-апаратного комплексу на основі сучасних інструментів моделювання та вимірювання, а також формування повноцінної системи керування, здатної забезпечувати адаптивне функціонування електропривода в реальному часі. Такий підхід дозволяє не лише теоретично описати процеси, що відбуваються в електромеханічній системі, але й реалізувати їх практичне відтворення за допомогою інтегрованих апаратних і програмних засобів, що значно підвищує точність, стабільність та ефективність роботи приводу.

ABSTRACT

of the qualification thesis on the topic:

“Development of an Energy-Saving Control Algorithm for a Dual-Supply Switched Reluctance Drive”

The thesis contains 75 pages, 17 figures, 1 table, and 24 references.

Keywords: electric drive control system, dual-supply switched reluctance motor, electric drive, LabVIEW environment.

The object of the master's qualification work is the development of an electric drive with a dual-supply switched reluctance motor, considered as a complex electromechanical system intended for automated control.

The subject of the master's qualification work includes algorithms and methods of energy-saving control for a dual-supply switched reluctance motor, as well as mathematical models and hardware-software tools used to implement the real-time electric drive control system.

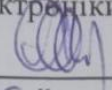
The purpose of the qualification work is to develop an intelligent electric drive control system based on real-time mathematical modeling.

The completed work provides a comprehensive development that includes creating a detailed mathematical model of a dual-supply switched reluctance motor, building a hardware-software complex using modern modeling and measurement tools, and forming a complete control system capable of providing adaptive real-time operation of the electric drive. This approach allows not only to theoretically describe the processes occurring in the electromechanical system but also to implement their practical reproduction using integrated hardware and software means, significantly increasing the precision, stability, and efficiency of the drive.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Рівень вищої освіти Магістр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматичної,
електроніки та телекомунікацій


О.В. Шефер
“ 15 ” 09 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Щербініну Данилу Віталійовичу

1. Тема проекту (роботи) **«Розроблення алгоритму енергозберігаючого управління індукторним динамічним електроприводом подвійного живлення»**
керівник проекту (роботи) Єрмілова Наталія Василівна, к.т.н., доцент
затверджена наказом вищого навчального закладу від 03.09.2025 р. № 1025-ф.а
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Тип двигуна: індукторний подвійного живлення. Номінальна потужність: 5-15 кВт, ККД: 88-90%. Середовище моделювання: MATLAB або LabVIEW. Критерії енергозбереження: мінімізація втрат у міді, зменшення втрат у сталі, зниження реактивної потужності, оптимізація співвідношення струмів у статорі та роторі. Умови експлуатації: вимоги до точності регулювання швидкості: $\pm 1\%$, вимоги до моменту: стабільність при змінному навантаженні. Обмеження по енергоспоживанню: робота в режимі мінімальних втрат при часткових навантаженнях. Алгоритм має працювати в реальному часі. Забезпечення стійкості системи при зміні навантаження. Врахування нелінійності індукторного двигуна. Можливість масштабування алгоритму для двигунів різної потужності. Безвідмовна робота не менше 10000 годин.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз предметної області. Теоретичні основи енергозберігаючого управління. Розроблення алгоритму управління. Розроблення системи керування приводом. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):

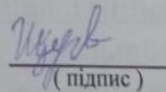
- 1) Аналіз предметної області
- 2) Програмно-апаратний комплекс
- 3) Структурна схема пристрою керування ІДГЖ
- 4) Діаграма розгортання проєкту
- 5) Математичне моделювання двигуна подвійного живлення у власних осях обмоток
- 6) Розроблення системи керування електроприводом
- 7) Програмне забезпечення установки
- 8) Висновки

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

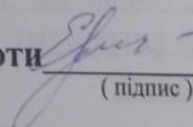
№	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Дата початку	Категорія	Відсоток	
1	Аналіз предметної області	07.10.25		15%	Пл. 1
2	Розроблення програмно-апаратного комплексу	21.10.25	I	25%	Пл. 2
3	Побудова діаграми розгортання проєкту	11.11.25		45 %	Пл. 4
4	Математичне моделювання двигуна подвійного живлення у власних осях обмоток	18.11.25	II	60%	Пл. 5
5	Розроблення алгоритму управління	25.11.25		70%	Пл. 6,7
6	Розроблення системи керування електроприводом	09.12.25		90%	Пл. 8
7	Оформлення пояснювальної записки	22.12.25	III	100%	

Магістрант


(підпис)

Щербінін Д.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Єрмілова Н.В.
(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	11
1.1 Загальна інформація про електроприводи.....	11
1.2 Інструменти, що використовуються при розробленні автоматизованих систем керування.....	13
1.3 Програмно-апаратний комплекс.....	13
1.4 Аналіз об'єкта керування.....	19
2. РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАКОНУ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ	25
2.1 Вимоги до пристрою керування електроприводом	25
2.2 Структурна схема пристрою керування ІДПЖ	27
2.3 Подання об'єкта керування у вигляді математичної моделі.....	29
2.4 Математична модель двигуна подвійного живлення у власних осях обмоток.....	30
2.5 Математична модель двигуна подвійного живлення в єдиній системі оберткових координат.....	33
2.6 Спрощена нелінійна модель ДПЖ.....	37
3. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	41
3.1 Опис використаної установки.....	41
3.2 Програмне забезпечення установки.....	43
3.3 Основні технічні рішення, що використовуються під час створення віртуальних приладів.....	48
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72
ДОДАТКИ.....	75

ВСТУП

На сьогоднішній день електроприводи знайшли широке застосування у різних галузях промисловості, транспорту, побутової техніки та автоматизованих систем керування. Зі зростанням кількості типів електроприводів, а також розширенням їх технічних і функціональних характеристик, значно підвищуються вимоги до їх експлуатаційних можливостей.

Сучасні системи електроприводів повинні забезпечувати високу точність позиціонування, покращені динамічні характеристики, надійність у роботі, економічне енергоспоживання, а також відповідати вимогам щодо маси та габаритів. Крім того, важливими критеріями є швидкодія, стабільність, адаптивність до змін навантаження та здатність до інтеграції у складні автоматизовані комплекси.

Серед різноманіття електроприводів, що використовуються у виробничих процесах, окрему категорію становлять високоточні (прецизійні) електроприводи. Вони призначені для виконання задач, де необхідна надзвичайно точна регуляція руху, наприклад, у верстатах з числовим програмним керуванням, медичному обладнанні або робототехніці.

Технічні властивості електроприводу визначаються рядом факторів: типом електродвигуна, методом керування, архітектурою системи приводу, а також використаними елементами, такими як датчики, джерела живлення, регулятори та інші компоненти. Удосконалення електроприводів може здійснюватися як комплексно, шляхом модернізації всієї системи, так і локально, з урахуванням специфіки окремих складових, що дозволяє досягти оптимального балансу між продуктивністю, точністю та енергоефективністю.

Серед великої кількості об'єктів автоматизації можна виокремити ті системи, в яких участь людини у виконанні технологічних операцій зведена до мінімуму. До таких систем належать, зокрема: конвеєрні стрічки, трикоординатні позиціонуючі механізми, а також системи повороту відповідальних установок, що потребують високої точності та надійності.

Для електроприводів, які використовуються в подібних автоматизованих комплексах, висуваються надзвичайно жорсткі вимоги щодо їх функціональних характеристик. Від їхньої здатності точно та стабільно виконувати задані команди залежить ефективність роботи всієї системи.

Загальні вимоги до таких електроприводів включають:

- 1) Можливість вибору режиму функціонування — система повинна підтримувати кілька режимів роботи, адаптуючись до змін умов або задач;
- 2) Стабільність обертання — забезпечення рівномірного та безперебійного обертання вихідного вала без коливань і збоїв;
- 3) Широкий діапазон регулювання швидкості — співвідношення мінімальної та максимальної швидкості має досягати 1:10000, що дозволяє точно керувати рухом у різних режимах;
- 4) Мінімальна похибка при наведенні — система повинна забезпечувати високу точність позиціонування, що критично для координатних і поворотних механізмів;
- 5) Робота в умовах обмеженого енергоспоживання — електропривод має бути енергоефективним, особливо в автономних або мобільних системах;
- 6) Оптиміальні масогабаритні характеристики — компактність і легкість конструкції дозволяють інтегрувати приводи у складні механізми без перевантаження;
- 7) Підвищений ресурс активної експлуатації — тривалий термін служби без втрати функціональності є важливою умовою для промислових систем.

Наявність вищезазначених вимог до електромеханічних систем обумовлює необхідність їх постійного вдосконалення. Одним із перспективних напрямів модернізації є впровадження двигунів змінного струму, зокрема тих, що працюють за принципом подвійного живлення (ДПЖ).

Двигуни з подвійним живленням поділяються на дві основні категорії. Перша — це конструкції, що базуються на класичних асинхронних двигунах з фазним ротором, які широко застосовуються у промисловості. Друга — менш поширені,

але технічно цікаві індукторні двигуни подвійного живлення (ІДПЖ), які поєднують у собі принципи електромагнітного редукування та подвійного живлення.

Завдяки використанню подвійного живлення ІДПЖ здатні забезпечувати рівномірне обертання ротора на низьких швидкостях, навіть при порівняно високих частотах живлення, що є важливою перевагою для систем, де потрібна точна регуляція руху. А застосування принципу електромагнітного редукування дозволяє багаторазово збільшити електромагнітний момент, що значно розширює функціональні можливості приводу.

У результаті індукторні двигуни подвійного живлення демонструють досить високі питомі енергетичні характеристики, що робить їх надзвичайно перспективними для використання у прецизійних електромеханічних системах. Вони відкривають шлях до створення безредукторних електроприводів, які поєднують точність, енергоефективність та конструктивну простоту.

Актуальність обраної теми дослідження зумовлена нагальною потребою у вдосконаленні сучасних систем керування електроприводами, особливо з урахуванням інтеграції мехатронних принципів, які поєднують механіку, електроніку, програмне забезпечення та системи керування в єдину функціональну структуру. Такий підхід дозволяє досягти високої точності, гнучкості та ефективності в управлінні електромеханічними процесами.

Метою даної роботи є розробка інтелектуальної системи керування електроприводом, яка базується на математичному моделюванні в режимі реального часу. Це дозволяє оперативно реагувати на зміну параметрів системи, забезпечуючи адаптивне управління та підвищену продуктивність.

Об'єктом кваліфікаційної роботи магістранта є розроблення електроприводу з індукторним двигуном подвійного живлення, який розглядається як складна електромеханічна система для автоматизованого керування.

Предметом дослідження є електропривод, що працює на базі індукторного двигуна подвійного живлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку науково-технічних завдань, серед яких:

- Провести детальний аналіз функціональних характеристик індукційних двигунів подвійного живлення, а також дослідити різні методи керування електроприводами, з урахуванням їх переваг та обмежень у контексті мехатронних систем;
- Здійснити оцінку можливостей програмно-апаратного комплексу, побудованого на основі середовища LabVIEW від компанії National Instruments, з метою реалізації математичної моделі. Особливу увагу слід приділити кросплатформенній взаємодії цього програмного забезпечення з іншими системами, що підтримують обчислення в реальному часі;
- Запропонувати оптимальні варіанти використання апаратних ресурсів та програмних інструментів, наданих розробником National Instruments, з урахуванням специфіки математичної моделі, яка реалізується в рамках даного дослідження;
- Розробити методичні рекомендації щодо практичного застосування створеної системи, враховуючи особливості поставленої задачі. Підсумком виконаної роботи є створене програмне забезпечення у середовищі LabVIEW, яке забезпечує моделювання електромеханічних процесів в електроприводі з високою точністю та швидкістю.

1 Аналіз предметної області

1.1 Загальна інформація про електроприводи

Електроприводи є електромеханічними системами, що застосовуються для приведення в дію функціональних вузлів і агрегатів машин з метою виконання певних технологічних процесів. Електроприводи складаються з електродвигунів, пристроїв керування та передавальних механізмів.

У сучасній промисловості електроприводи відіграють ключову роль, оскільки забезпечують перетворення електричної енергії в механічну, а також дозволяють здійснювати регулювання швидкості, моменту та інших параметрів роботи машин.

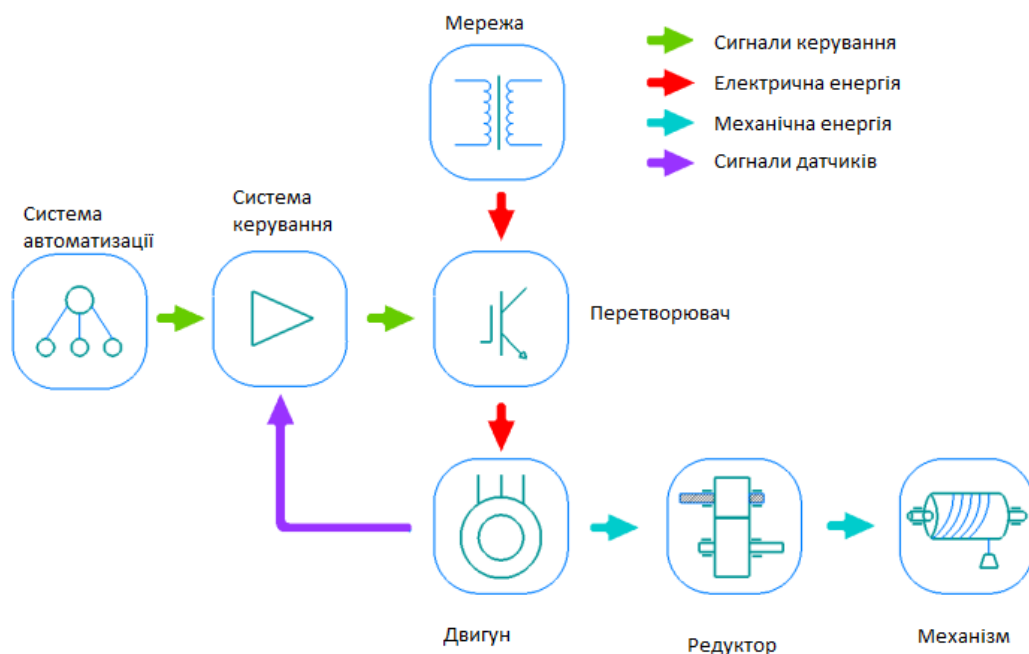


Рисунок 1.1 – Структура сучасного електропривода

Слід розглянути структуру, типи, класифікацію електроприводів та вимоги, що до них висуваються.

Функціональними частинами електроприводу є:

- 1) електродвигун;
- 2) механічна частина;
- 3) система керування.

Виконавчий механізм є пристроєм, що переміщує робочий орган за сигналом, який надходить від керуючого механізму. Робочі органи можуть рухатися поступально, обертально або за довільною траєкторією. За допомогою робочих органів здійснюється вплив на об'єкт. Найчастіше електропривод виступає як виконавчий механізм, що включає електродвигун, механічну та керуючу частини [1].

До електропривода висуваються вимоги щодо зменшення маси, ефективного використання енергії, надійності, точності, швидкодії та зручності експлуатації.

Електропривод може бути:

- 1) електричним, що включає механічну та електричну частини;
- 2) мехатронним, що включає сенсори, системи керування, механічну та електричну частини.

Електропривод — це система, яка охоплює сукупність швидкісних і координатних переміщень.

- Координатні переміщення показують залежність координат виконавчого органа від часу та виражаються у вигляді класифікації.
- Швидкісні переміщення показують залежність швидкості виконавчого органа від часу та також виражаються у вигляді класифікації.

Класифікація електроприводів:

- за типом руху: обертальні, поступальні, змішувальні, комбіновані;
- за принципом регулювання: нерегульовані, регульовані, з програмним керуванням, ручним керуванням, адаптивні тощо.
- за видом передавального пристрою (редукторний, безредукторний, електромагнітний, магнітогідродинамічний);
- за видом перетворювального пристрою (вентильний, випрямляч-двигун, частотний перетворювач-двигун, генератор-двигун, магнітний підсилювач-двигун);
- за видом зв'язку між ланками (груповий, індивідуальний, взаємопов'язаний);

- за рівнем автоматизації (автоматизовані, напівавтоматичні, автоматичні);
- за видом струму (постійного струму, змінного струму);
- за джерелом енергії (основний або допоміжний).

Системи керування електроприводами є складними. Система керування (СК) привода має можливість багаторазової зміни режиму роботи, що дозволяє підвищити продуктивність і ефективність праці, покращити якість продукції, знизити її собівартість.

1.2 Інструменти, що використовуються при розробленні автоматизованих систем керування

На сьогодні системи електроприводів є надзвичайно складними програмними комплексами, точність, масштабованість і надійність яких мають першочергове значення.

З метою забезпечення відповідності сучасним вимогам і підвищення якості створюваних систем керування необхідно застосовувати сучасні інструменти розроблення. Найбільш популярними засобами розроблення на світовому ринку є численні системи та програмні засоби, інтегровані для проєктування [2].

Інтегроване середовище розробки (IDE) — це складне програмне середовище, яке використовується програмістами для створення програмного забезпечення. IDE поєднує в собі набір інструментів, що значно полегшують процес програмування.

Основні компоненти IDE:

- Редактор вихідного коду — для написання та редагування програм;
- Компілятор або інтерпретатор — для перетворення коду у виконувану форму;
- Засоби налагодження (debugger) — для пошуку та виправлення помилок;
- Засоби автоматизації збірки — для зручного створення готових програм.

Сучасні IDE підтримують кілька мов програмування та дозволяють працювати з великими проєктами.

Приклади популярних IDE для C/C++:

- Microsoft Visual Studio

- C++ Builder
- CLion

Також існують IDE для інших мов і платформ, наприклад:

- Delphi
- Eclipse
- NetBeans та інші.

1. Програмована логічна інтегральна схема (ПЛІС) — електронний компонент, що використовується для створення цифрових інтегральних схем. Для програмування застосовуються мови опису апаратури, такі як Verilog, VHDL, AHDL тощо.
2. Розширення шини PCI для вимірювальних систем (PXI — PCI eXtensions for Instrumentation) — стандарт для модульних електронних вимірювальних систем. PXI має значні переваги в промисловому проєктуванні, забезпечує сумісність із різними спеціалізованими програмними засобами та системами зв'язку [3].

1.3 Програмно-апаратний комплекс

Для створення оптимальних вимірювальних систем широко застосовуються інструменти та рішення компанії *National Instruments*. Основним середовищем є LabVIEW, яке дозволяє інтегрувати апаратні та програмні засоби в єдину систему.

Додатково можуть використовуватися:

- ІСР-модулі,
- текстові редактори,
- середовище Visual Studio.

Програмно-апаратний комплекс забезпечує інтеграцію систем керування, включаючи ПЛІС, що дозволяє реалізовувати складні алгоритми в реальному часі.

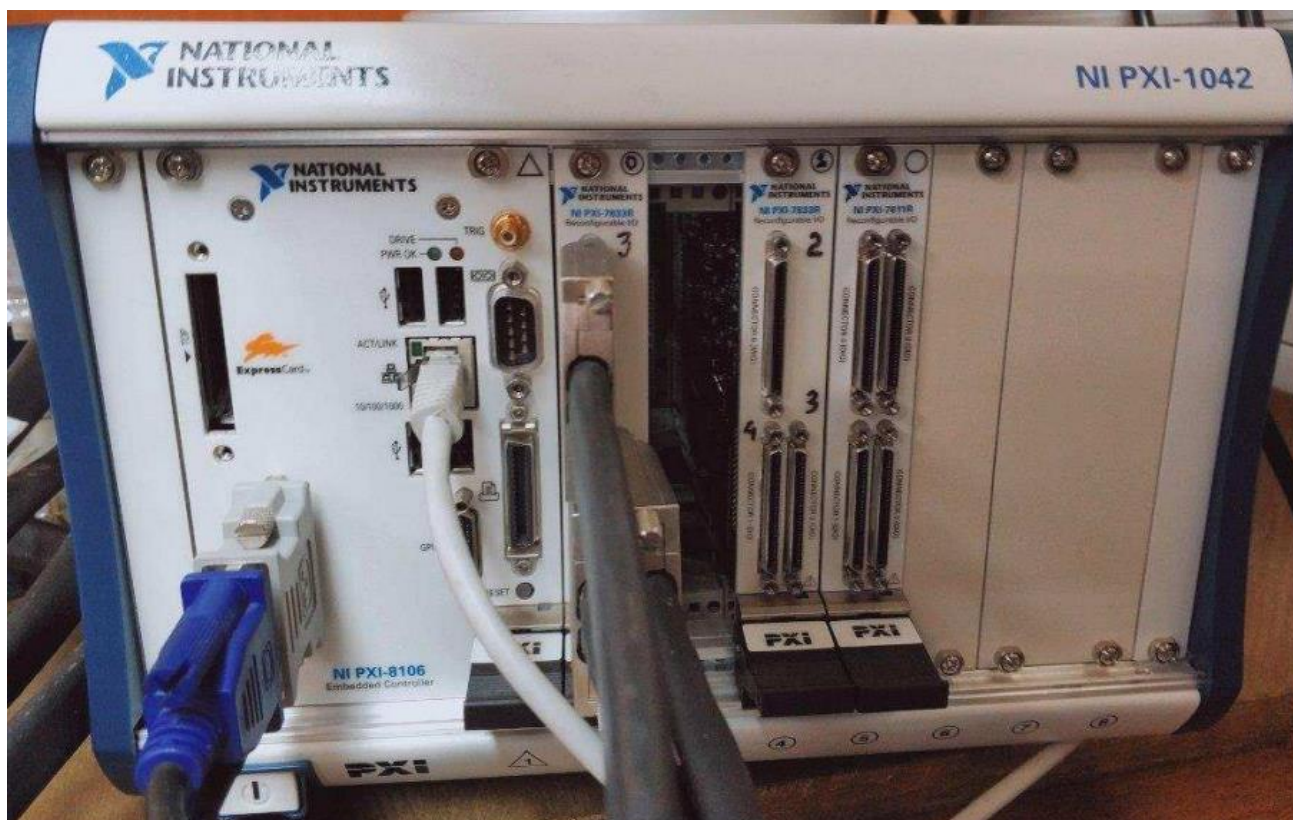


Рисунок 1.2 - Розташування модулів у платформі PXI

PXI – це високопродуктивна модульна платформа, призначена для створення автоматизованих вимірювальних та випробувальних комплексів. (Рис.1.2).

Варто зазначити, що PXI є відкритим промисловим стандартом для побудови автоматизованих контрольно-вимірювальних систем. Використання шини PCI та PCI Express дозволяє створювати системи на базі PXI з високою продуктивністю, а також синхронізувати роботу модулів за допомогою єдиного програмного забезпечення, яке забезпечує їхню синхронізацію та запуск.

Крім того, платформа PXI дозволяє застосовувати синхронні сигнали, сформовані на основі програмного забезпечення. PXI підтримує велику кількість програмних інтерфейсів, у тому числі популярні програмні засоби, а також надає можливість створювати власні застосунки у графічному середовищі LabVIEW або на традиційних мовах програмування C/C++.

PXI-платформа є модульною і може розширюватися за рахунок використання модулів RIO (Reconfigurable I/O), що базуються на ПЛІС (FPGA —

Field-Programmable Gate Array). Це дозволяє реалізовувати високошвидкісну обробку даних і створювати власну логіку керування безпосередньо на апаратному рівні.

Завдяки середовищу LabVIEW FPGA користувач може розробляти індивідуальні алгоритми обробки сигналів, керування та обміну даними, які виконуються на ПЛІС. Це забезпечує високу продуктивність і гнучкість системи.

Важливим елементом є системи реального часу (RTS), які працюють під керуванням операційних систем реального часу (RTOS). Вони керують обчислювальними ресурсами та гарантують своєчасне виконання завдань.

Основні характеристики систем реального часу:

- детермінованість виконання завдань;
- здатність реагувати на зовнішні події у визначений часовий інтервал;
- передбачуваність і стабільність роботи;
- висока надійність у критичних застосуваннях.

Завдяки інтеграції апаратних і програмних засобів такі системи широко застосовуються у вбудованих рішеннях, промисловій автоматизації та керуванні електроприводами.

У цілому, операційна система (ОС) відповідає за керування апаратними ресурсами комп'ютера та прикладними програмами, що працюють на ньому.

Операційна система реального часу (ОСРЧ) виконує аналогічні завдання, але спеціально розроблена для роботи в системах із жорсткими вимогами до точності за часом і рівня надійності. Ці параметри можуть бути критично важливими у вимірювальних та автоматизованих системах, коли простої є дороговартісними, коли збої можуть становити загрозу безпеці, або в системах, де обслуговувальні процеси є безперервними [4].

Щоб операційну систему можна було охарактеризувати як «систему реального часу», вона повинна мати відоме максимальне значення часу для виконання кожної з критичних операцій (або можливість його гарантувати). ОС реального часу повинна забезпечувати завершення всіх критичних операцій у межах цього часу.

Операційна система та процеси, що працюють під її керуванням, можуть гарантувати максимальний час відгуку, на відміну від більшості систем, які не належать до «жорсткого реального часу».

У той час як операційні системи, які можуть гарантувати максимально велику частку часу, називаються системами «м'якого реального часу».

У практичному застосуванні ці категорії мають велику корисність, адже кожне окреме рішення ОСРЧ демонструє унікальні характеристики продуктивності. Якщо програмний код виконується у реальному часі, ОСРЧ може забезпечувати виконання завдань у визначеній послідовності з дотриманням часових обмежень. Таким чином, ОСРЧ дозволяє виконувати завдання, у яких дотримуються часові рамки або пріоритети, а також забезпечує контроль самих часових параметрів.

ОСРЧ, встановлена на РХІ, взаємодіє з персональним комп'ютером, на якому запускається проєкт або віртуальний прилад, що завантажується в систему за допомогою модуля реального часу LabVIEW Real-Time [3].

Сама ж LabVIEW — це спеціалізоване графічне середовище розробки застосунків, створене на основі графічної мови програмування G, у якій використовується парадигма потоків даних. Основою роботи програми потоків даних є активація обчислень на вузлах, які можна вважати «чорними скриньками», що запускаються змінами або оновленнями вхідних даних.

Вузол — це елемент, який обробляє дані на вході та формує вихідні дані. Робота вузла в момент активації даних вважається обчисленням.

Вузли надсилають і приймають дані через порти — точки з'єднання дуг і вузлів. Вхідні дані надходять у вхідні порти. Обчислювальна робота вузла викликається активацією.

У стані активації вузол:

- приймає вхідні дані,
- виконує обчислення,
- передає вихідні дані у відповідні порти.

Передавані дані називаються токенами. Токен — це одиниця передачі з'єднання. Поява даних на вхідній дузі може викликати активацію вузла.

Основою програмування потоків даних є те, що програма у результаті подається у вигляді орієнтованого графа, де всі варіанти взаємодії між елементами задаються програмістом.

Проста схема конвеєрної обробки полягає в тому, що обчислення виконуються послідовно при надходженні токенів. Такий підхід забезпечує паралельність обчислень, оскільки вузли, які не залежать один від одного, можуть виконуватися одночасно. Це усуває необхідність у ручному розподілі завдань між кількома процесорами.

LabVIEW (від англ. *Virtual Instrument* — віртуальний прилад) реалізує концепцію програмування потоків даних. Віртуальний прилад у LabVIEW складається з двох основних частин:

1. Фронтальна панель — інтерфейс візуалізації віртуального приладу (графічне представлення даних, елементи керування, індикатори).
2. Блок-схема — програмний код віртуального приладу, що описує логіку обробки даних. Віртуальні прилади можуть використовуватися як користувачькі бібліотеки для побудови інших віртуальних інструментів.

Фронтальна панель віртуального приладу містить інформаційні та керуючі індикатори різних типів, які в основному застосовуються для введення даних і керування роботою віртуального приладу.

Блок-схема віртуального приладу включає функціональні вузли, що виконують роль джерел, приймачів і елементів обробки даних. До складу блок-схеми також входять термінали та керуючі структури, серед яких:

- цикли FOR і WHILE,
- умовні оператори типу IF.

Функціональні вузли та термінали з'єднуються між собою системою зв'язків, що забезпечує передачу даних і логіку роботи програми.

LabVIEW підтримує широкий спектр обладнання різних виробників і містить у своєму складі численні бібліотеки компонентів:

- 1) для підключення зовнішнього обладнання за найбільш поширеними інтерфейсами та протоколами (RS-232, GPIB-488, TCP/IP);
- 2) для віддаленого керування ходом експерименту;
- 3) для керування роботами та системами машинного зору;
- 4) для застосування різних математичних методів обробки даних;
- 5) для візуалізації даних і результатів їх обробки (включаючи 3D-моделі);
- 6) для моделювання складних систем;
- 7) для формування інформації у базах даних і генерації звітів;
- 8) для взаємодії з іншими застосунками в межах компонентів COM/DCOM/OLE.

1.4 Аналіз об'єкта керування

Система електропривода (ЕП) головним чином визначається типом електродвигуна, способом керування та принципом побудови системи ЕП.

Існують такі класифікації електродвигунів:

- 1) за типом зміни положення рухомої частини — обертальний, поступальний;
- 2) за типом напруги живлення — постійного або змінного струму;
- 3) за типом конфігурації магнітної системи — явнополюсна, неявнополюсна тощо;
- 4) за властивостями магнітної системи — наявність або відсутність постійних магнітів, місце їх розташування.
- 5) способом з'єднання обмоток із джерелами живлення — нерозривні контакти, контактні кільця.

Особливо поширені електродвигуни постійного струму, синхронні, асинхронні та крокові. Властивості двигунів характеризуються можливостями регулювання кутової швидкості та її напрямку, видом механічної характеристики, характером зміни коефіцієнта корисної дії, точністю й швидкодією керуючих впливів, а також статичним моментом навантаження. [1]

Як елементну базу розглядають:

- синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ),
- синхронні двигуни з електромагнітною редукцією (СДЕР),

- індукторні двигуни подвійного живлення (ІДПЖ).

Усі перелічені типи двигунів можуть застосовуватися самостійно, і кожен із них має свої специфічні властивості.

СДПМ (синхронні двигуни з постійними магнітами) та СДЕР (синхронні двигуни з електромагнітною редукцією) мають гарні масо-габаритні показники, у цьому плані їм поступаються ІДПЖ (індукторні двигуни подвійного живлення).

СДПМ і СДЕР забезпечують однаково широкий діапазон рівномірних швидкостей. При низьких швидкостях та імпульсному живленні можливий режим «крокування» СДПМ і СДЕР. Щоб уникнути цього режиму, виникає необхідність збільшити передавальне число механічного редуктора, що зменшує позитивний ефект від електромагнітної редукції СДЕР і негативно впливає на надійність та масо-габаритні параметри електропривода. [2]

Синхронні двигуни з постійними магнітами у порівнянні з двома іншими типами електродвигунів споживають менше електроенергії завдяки наявності постійних магнітів.

Постійні магніти мають властивість розмагнічуватися залежно від їх типу. Зазвичай СДПМ виконують багатополюсними, а на роторі розташовують групу постійних магнітів за кількістю пар полюсів. У зв'язку з цим характеристики під час тривалої експлуатації можуть змінюватися, що позначається на рівномірності обертання.

Принцип подвійного живлення передбачає формування двох обертових електромагнітних полів за допомогою двох багатофазних обмоток, які живляться від двох різних багатофазних напруг.

Його класична реалізація здійснюється в асинхронних двигунах із фазним ротором, у яких обидві обмотки (статорна та роторна) живляться багатофазними напругами змінного струму. [1]

Принцип електромагнітної редукції забезпечує такі позитивні властивості для електродвигунів:

- обмотки розташовуються на статорі, що призводить до відсутності ковзних контактів і, відповідно, підвищує надійність та термін активної служби двигуна;
- при цьому забезпечується кращий відвід тепла від усіх обмоток у порівнянні з двигунами, у яких одна з обмоток розташована на роторі;
- це дозволяє збільшити номінальні значення струмів обмоток і підвищити номінальну та максимальну потужність двигуна.
- електромагнітна редукція дозволяє отримувати знижені кутові швидкості та підвищені значення електромагнітного моменту порівняно з класичними двигунами, що еквівалентно використанню вбудованого редуктора з передавальним числом від кількох десятків до кількох сотень;
- безконтактна електромагнітна передача замінює контактну механічну, що забезпечує повну відсутність зношування і, відповідно, відсутність похибок механічних передач (які, до того ж, змінюються в процесі експлуатації), а також підвищення надійності, сталість параметрів і працездатності протягом багатьох років експлуатації.

У результаті значно зменшуються або повністю зникають похибки, що вносяться редуктором (у тому числі й у процесі його зношування), підвищується надійність електропривода завдяки усуненню великої кількості механічних частин, які контактують між собою. [2]

Принцип подвійного живлення забезпечує такі позитивні властивості для двигунів:

- можливість отримання вкрай низьких кутових швидкостей (аж до одиниць обертів на добу, тиждень чи місяць) за умовно високих частот живлення напруги (наприклад, якщо одну з обмоток живити напругою з частотою 200 Гц, а іншу — з частотою 200,1 Гц, то при відповідному числі полюсів утворюється 0,1 Гц, а швидкість ротора буде у стільки ж разів меншою, скільки зубців має ротор).
- Діапазон регулювання швидкості може досягати десятків тисяч при діапазоні зміни частоти всього у кілька одиниць;

- Високі частоти напруги живлення забезпечують майже синусоїдальний характер струмів у обмотках у всьому діапазоні регулювання, що гарантує малі пульсації електромагнітного моменту та високу рівномірність обертання;
- Простота реалізації реверсу (шляхом зміни однієї частоти відносно іншої).
- Найбільші функціональні можливості регулювання швидкості та кута повороту ротора у порівнянні з усіма іншими типами двигунів (прикладом є режим «синхронного стояння», коли обидві обмотки живляться напругами з однаковими частотами, внаслідок чого швидкість дорівнює нулю при жорсткому утриманні ротора у фіксованому положенні за будь-яких зовнішніх впливів).
- Поєднання позитивних властивостей і принципів електромагнітної редукції та подвійного живлення робить ІДПЖ (індукторний двигун подвійного живлення) відмінним варіантом для низькошвидкісних електроприводів.
- Варто зазначити, що можливості електродвигуна поєднуються з можливостями способів керування, забезпечуючи різноманіття технічних рішень.
- Розглянуті електроприводи, головним чином, застосовуються з метою запобігання виходу із синхронізму при різких змінах керуючих сигналів. Для цього СДПМ та СДЕР використовуються в одному з варіантів частотно-струмового керування.
- Способи керування прямо пропорційно пов'язані з принципами побудови підсилювачів потужності для живлення електродвигунів (ЕД). При цьому можливе використання джерел напруги й струму, релейних регуляторів та широтно-імпульсної модуляції, місцевих і головних зворотних зв'язків за струмом, кутом навантаження, швидкістю та кутом повороту.
- Зворотні зв'язки, що застосовуються під час реалізації способів керування, можуть надалі використовуватися при побудові всієї системи керування.

Індукторний двигун подвійного живлення дозволяє використовувати різні способи керування з урахуванням принципу подвійного живлення. Керування за двома обмотками ІДПЖ із застосуванням звичайних електронних блоків у вигляді окремих пристроїв суттєво ускладнює задачу побудови простих і надійних електроприводів. Однак використання принципів мікропроцесорної обробки даних і формування законів зміни керуючих величин дає змогу мінімізувати апаратну частину системи керування. Відмінною рисою ІДПЖ є те, що двигун має мінімальні конструктивні обмеження щодо керування. У випадку мікропроцесорного керування складність законів керування не відіграє ключової ролі, що відкриває можливості для використання нових способів керування ІДПЖ.

Фазове керування передбачає зміну фаз живильних напруг. У цьому випадку обмотки ІДПЖ живляться напругою однакової частоти, що призводить до переміщення ротора двигуна у потрібному напрямку.

Даний спосіб керування дозволяє забезпечити фіксацію положення ротора навіть у розімкнених системах при живленні обмоток номінальними напругами (так званий режим «синхронного старту»); високу плавність переміщення при повзучих швидкостях, оскільки обмотки живляться напругами високої частоти, що забезпечує відфільтровування вищих гармонік струму.

Керування перехідними процесами за допомогою фазових зсувів можливо здійснювати й в інших, специфічних для ІДПЖ режимах, при цьому необхідно враховувати низку особливостей.

Керування за допомогою фазових зсувів може здійснюватися за тими ж алгоритмами, що й розглянуте вище змінювання частот, а саме:

- зміною одного фазового зсуву (збільшення або зменшення) при сталості другого;
- одночасною зміною обох фазових зсувів у протилежні боки (перший збільшується, а другий — зменшується);
- одночасною зміною обох фазових зсувів у бік збільшення;
- одночасною зміною фазових зсувів у бік зменшення.

При зміні фазових зсувів за будь-яким із алгоритмів у перший момент часу кут повороту ротора внаслідок його інерційності залишається незмінним (у випадку нерухомого двигуна) або змінюється в попередньому темпі (у випадку обертання ротора). Тому миттєво змінюється (в один чи інший бік) кут навантаження (без урахування коефіцієнта електромагнітної редукції).

Миттєва (безінерційна) зміна кута навантаження пов'язана з тим, що регульовані фазові зсуви живильних напруг змінюються миттєво. Темп зміни створює відповідні обертання частот, і вже в наступний після початкового момент часу це призводить до додаткової зміни кута навантаження відповідно до виразу. [2]

Висновок до розділу. Таким чином, керування ІДПЖ шляхом зміни фазових зсувів виявляється складним процесом, що включає також регулювання зміни частот живлення. Різноманіття наданих при цьому можливостей дозволяє відносно простими методами досягати результатів, які при керуванні приводами двигунів змінного струму виявляються недосяжними або важкодоступними. Розробка способів керування, заснованих на фазовому керуванні ІДПЖ, дає змогу вирішувати нетривіальні завдання та відкриває широкі можливості для реалізації конкретних рішень під час проектування автоматизованих і промислових електроприводів, забезпечуючи високі динамічні, точнісні та масогабаритні показники.

2 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАКОНУ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ

2.1 Вимоги до пристрою керування електроприводом

У загальному випадку до електроприводів висуваються такі вимоги:

1. Надійність — означає, що електропривод зобов'язаний виконувати задані функції в обумовлених умовах протягом визначеного проміжку часу. Якщо ця вимога не забезпечена, всі інші його характеристики втрачають сенс. Саме тому вимога надійності є основним показником, що характеризує електропривод;
2. Точність — цей показник стосується головної функції електроприводу — здійснювати керований рух. Найбільш коректно говорити про забезпечення електроприводом необхідної точності, тобто про відхилення будь-якого параметра руху від заданого, яке не перевищує допустимого значення.

Таким чином, неточність зупинки кабіни навіть дуже якісного ліфта може становити ± 1 мм; похибка позиціонування руху, що здійснює тестування мікросхем у процесі їх виготовлення, не повинна перевищувати ± 10 мкм тощо.

Електропривод має підтримувати задану швидкість руху стрічки транспортера незалежно від її завантаження, сили натягу дроту або нитки під час їх перемотування, прискорення центрифуги при випробуваннях і в біологічних об'єктах.

Слід розуміти, що при цьому завжди існують допустимі відхилення від заданих значень, перевищення яких є неприпустимим.

3. Швидкодія — означає здатність системи достатньо швидко реагувати на різні впливи. Наприклад, необхідно надзвичайно швидко — за соті частки секунди — усунути відхилення від заданого положення антени радіотелескопа, спричинені поривами вітру. Навпаки, надмірно швидкий початок руху трамвая може призвести до неприємних наслідків.

Швидкодія пов'язана зі змінами в часі, з динамічними процесами в системі.

4. Якість динамічних процесів — тобто забезпечення певних закономірностей їх перебігу в часі. Наприклад, у ліфті з якісним електроприводом режими початку руху та уповільнення виявляються не надто чутливими для людського організму.

5. Енергетична ефективність — цей показник став особливо актуальним останнім часом. Оскільки будь-який процес передавання та перетворення енергії супроводжується її втратами, важливо знати, якою є питома частка цих втрат.

Наприклад, якщо електропривод виконує операцію намотування дроту певного діаметра та матеріалу в бухту, отриманого з волочильного стану, то важливо, скільки електроенергії буде витрачено на одну тону готової продукції — звісно, за заданих параметрів якості.

Для електропривода преса буде актуальним показник витрати енергії на 1 тону деталей певного типу. Часто енергетичну ефективність оцінюють коефіцієнтом корисної дії (ККД) — як відношення корисно витраченої енергії до її загального споживання в даному процесі.

6. Сумісність електропривода з системою електропостачання та інформаційною системою вищого рівня є важливим показником, який набув суттєвого значення останнім часом, коли до складу електропривода увійшли напівпровідникові перетворювачі, що генерують вищі гармоніки та через це шкідливо впливають на живильну мережу, а іноді й на електронні керуючі пристрої.

7. Ресурсоємність — означає матеріаломісткість та енергоємність, закладені в конструкцію та технологію виробництва, а також трудомісткість під час виготовлення, монтажу, налагодження, експлуатації та ремонту.

Зі зростанням кількісних і якісних вимог до електроприводів зросли й вимоги до керуючих систем. Однак, оскільки керуюча система побудована на мікропроцесорній основі, її можливості щодо продуктивності є цілком достатніми.

Очевидно, що складність системи керування передусім визначається вимогами, які до неї висуваються, зокрема:

- 1) мінімальний час відгуку системи;
- 2) точність формування ШІМ-сигналів;
- 3) рівномірність подачі сигналів на об'єкт керування;
- 4) можливість динамічної зміни закону керування;
- 5) мінімальний час обробки даних, отриманих із датчиків;
- 6) відмовостійкість.

2.2 Структурна схема пристрою керування ІДПЖ

До складу об'єкта дослідження входять: індукційний електропривод подвійного живлення, що включає ІДДП; цифровий датчик кутового положення; датчики струму; силові модулі інверторів; механічне навантаження; а також апаратура компанії *National Instruments*.

Використовується модульна платформа PXI-1042. У складі платформи присутній вбудований контролер PXI-8106RT, який постачається в комплекті з операційною системою реального часу (ОСРЧ).

Контролер PXI RT за допомогою шини PXIe, яка є вдосконаленим варіантом комп'ютерної шини PCI, взаємодіє з модулями, встановленими в системі, зокрема з багатофункціональними модулями введення/виведення NI PXI-7811R та NI PXI-7833R.

Ці модулі реалізовані на ПЛІС і, залежно від конфігурації, мають:

- для версії 7833-R — 8 каналів аналогового введення/виведення та 96 цифрових ліній введення/виведення;
- для версії 7811-R — 132 цифрові лінії введення/виведення на кожен із підключених роз'ємів.

Електропривод з ІДПЖ при ФЗУ в загальному вигляді включає в себе двигун з першою та другою статорними обмотками, до яких відповідно підключені перший і другий інвертори з відповідними системами керування, що формують на своїх виходах потенціали живильних напруг.

Блок завдання керувань формує закони їх зміни, сигнали завдання амплітуд, частот і фазових зсувів живильних напруг — формуються залежно від бажаних значень кута повороту та кутової швидкості ротора.

Блок розподілу керувань формує з загальних сигналів завдання окремі сигнали для кожного з двох інверторів. Також до складу системи входять датчик кутового положення та механічне навантаження.

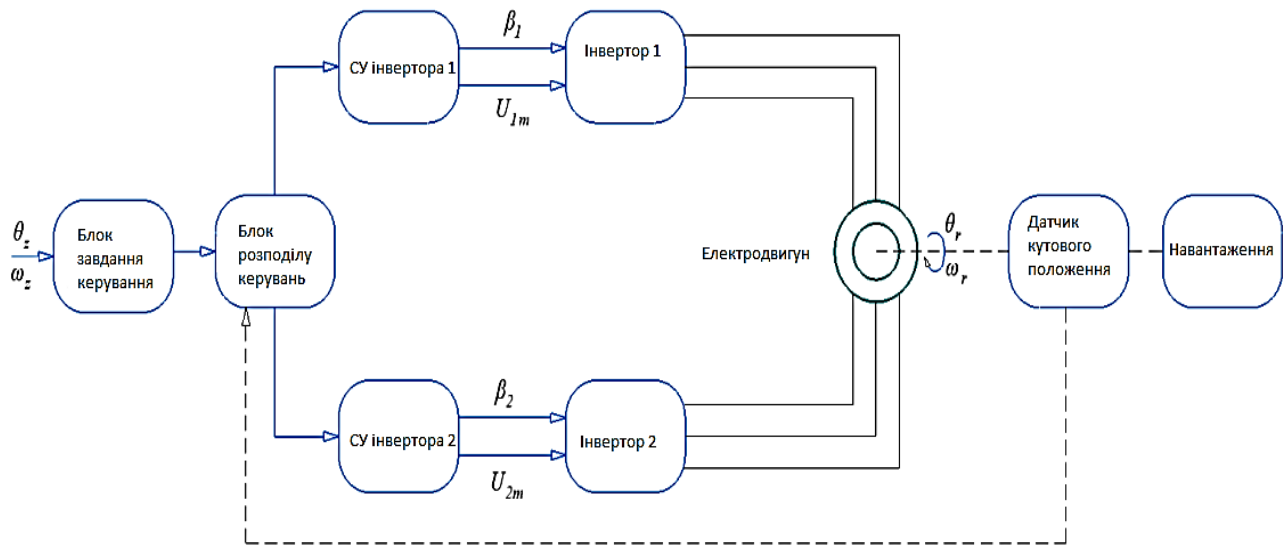


Рисунок 2.1 – Структурна схема індукційного електропривода подвійного живлення з фазозалежним керуванням у загальному вигляді

Під час розробки схем керування та збору даних для модуля NI PXI-7833R використовується програмний модуль LabVIEW FPGA у середовищі графічного програмування NI LabVIEW.

Програмні модулі, реалізовані на контролері та модулях введення/виведення, забезпечують роботу системи в режимі реального часу та дозволяють формувати синусоїдальні струми в двох трифазних обмотках ІДПЖ за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

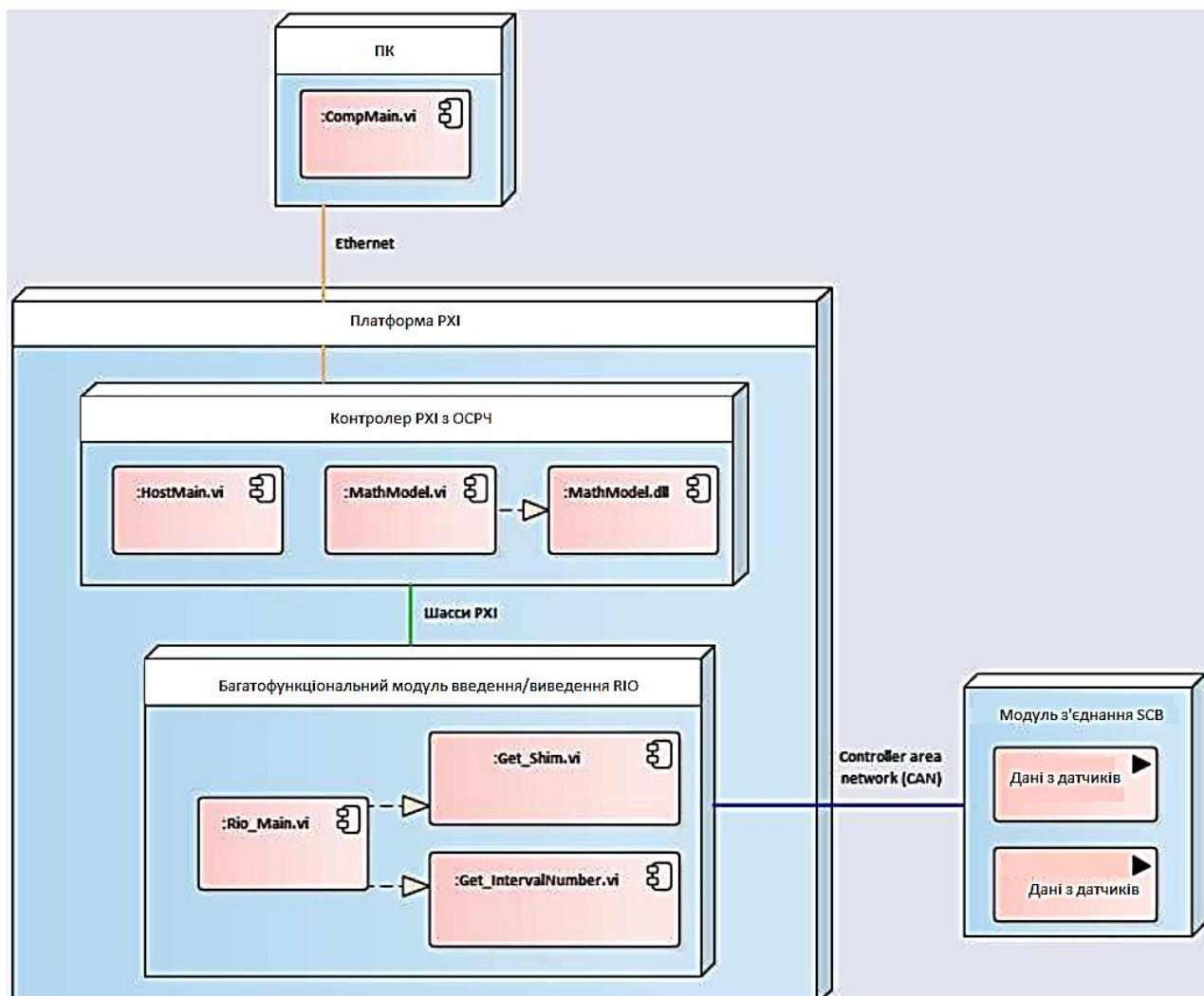


Рисунок 2.2 – Діаграма розгортання проєкту

Розроблене програмне забезпечення в середовищі LabVIEW складається з проєкту, представленого віртуальними інструментами, розміщеними на ПК, контролері PXI з операційною системою реального часу (ОСРЧ), а також багатфункціональному модулі введення/виведення з ПЛІС.

2.3 Подання об'єкта керування у вигляді математичної моделі

У якості базового математичного опису двигуна подвійного живлення в даному дослідженні використовується наукова праця «A fault tolerant motor drive for electric power steering systems», автором якої є професор Арафат Аль-Двейк. Зазначена робота містить глибоко структуровану систему математичних

моделей, що охоплює ключові аспекти функціонування електроприводів з подвійним живленням у контексті високоточної мехатроніки.

Розроблене математичне представлення двигуна подвійного живлення у цій праці є комплексним багаторівневим описом, який дозволяє вирішувати широкий спектр інженерних задач, пов'язаних із проєктуванням, моделюванням та оптимізацією електромеханічних систем. Важливо, що всі моделі побудовані на єдиній методологічній основі, що забезпечує узгодженість між теоретичними розрахунками та практичною реалізацією системи керування.

У межах даної дипломної роботи математична модель, Арафат Аль-Двейк, приймається як основоположна концепція, на якій базується реалізація системи керування електроприводом. Її використання дозволяє досягти високої точності позиціонування, стабільності обертання та адаптивності до змін навантаження, що є критично важливими параметрами для сучасних мехатронних систем. [1]

2.4 Математична модель двигуна подвійного живлення у власних осях обмоток

Схема підключення ДПЖ у загальному вигляді наведена на рисунку 2.3. Як джерела живлення розглядаються інвертори напруги.

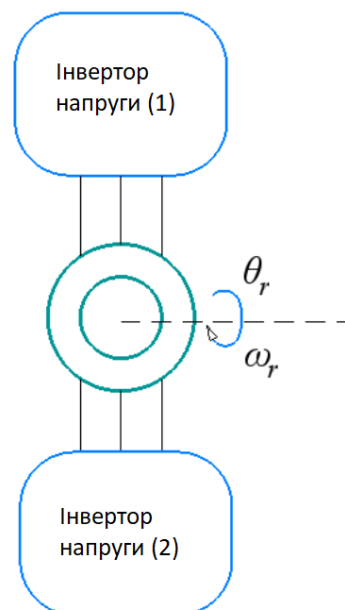


Рисунок 2.3 – Схема підключення ДПЖ.

Схема заміщення двигуна подвійного живлення наведена на рисунку 2.4.

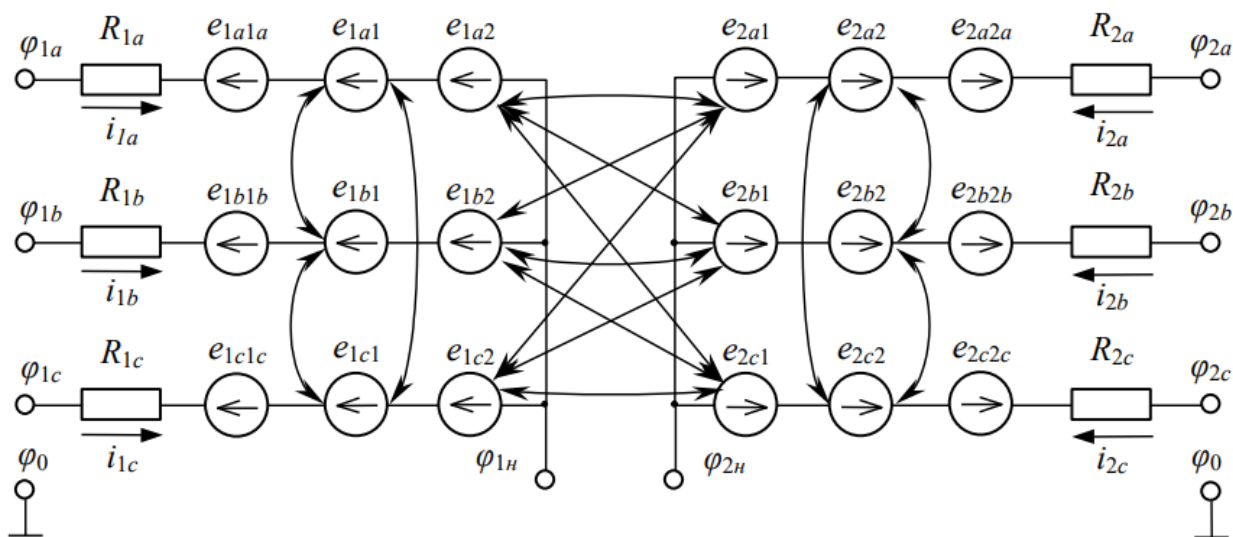


Рисунок 2.4 – Схема заміщення ДПЖ

Модель навантаження, що описується рівнянням руху, відокремлена від моделі двигуна. Тому основною вихідною змінною є обертовий момент, який надходить далі до моделі механічного навантаження. Кут повороту та кутова швидкість формуються саме в моделі механічного навантаження.

Як змінні стану прийняті потокозчеплення та струми обмоток, які пов'язані між собою через індуктивності та взаємні індуктивності. Вхідними змінними (на додаток до керуючих змінних — електричних потенціалів на вхідних клеммах обмоток) є кут повороту та кутова швидкість двигуна, що надходять із моделі навантаження.

визначають взаємодію між електричними параметрами системи та її механічною частиною.

Іншими словами, формулювання рівнянь рівноваги напруг для кожної з двох обмоток індукційного двигуна подвійного живлення, а також отримання виразу для обертового моменту, є ключовими етапами при моделюванні електромеханічної системи, що забезпечує її коректну роботу та точне керування:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{\Psi}_{\sigma 1}}{dt} = -R_1 \bar{\mathbf{i}}_{\sigma 1} + \bar{\Phi}_{\sigma 1}; \\ \frac{d\bar{\Psi}_{\sigma 2}}{dt} = -R_2 \bar{\mathbf{i}}_{\sigma 2} + \bar{\Phi}_{\sigma 2}; \\ M_{\sigma} = 0,5 \frac{d}{d\theta_{\sigma}} [\bar{\Psi}_{\sigma 1}^T \bar{\mathbf{i}}_{\sigma 1} + \bar{\Psi}_{\sigma 2}^T \bar{\mathbf{i}}_{\sigma 2}] \end{cases} \quad (2.1)$$

Обертовий момент двигуна, що виражається як похідна електромагнітної енергії за кутом повороту:

$$\begin{aligned} M_{\sigma} = \frac{d}{d\theta_{\sigma}} \left[0,5 \sum_{k=1a}^{k=2c} \psi_k i_k \right] = L_{12} \{ & [(i_{1b} + i_{1c} - 2i_{1a})i_{2a} + (i_{1a} + i_{1c} - 2i_{1b})i_{2b} + (i_{1a} + i_{1b} - 2i_{1c})i_{2c}] \sin(\theta_{\sigma}) + \\ & + \sqrt{3} [(i_{1b} - i_{1c})i_{2a} + (i_{1c} - i_{1a})i_{2b} + (i_{1a} - i_{1b})i_{2c}] \cos(\theta_{\sigma}) \} \end{aligned} \quad (2.2)$$

2.5. Математична модель двигуна подвійного живлення в єдиній системі обертових координат

У цьому підрозділі розглядається побудова математичної моделі індукційного двигуна подвійного живлення (ДПЖ) з використанням єдиної системи координат, що обертається. Такий підхід дозволяє спростити аналітичне представлення електромагнітних процесів, які відбуваються в обмотках статора та ротора, а також забезпечує зручність при синтезі алгоритмів керування.

Модель у системі обертових координат дає змогу ефективно описати динаміку електропривода, враховуючи взаємодію між електричними та

механічними змінними, що особливо важливо для реалізації керування в реальному часі на базі мікроконтролерів або цифрових сигнальних процесорів.

Для отримання математичної моделі ДПЖ доцільно застосовувати синхронну систему координат, яка обертається зі швидкістю вектора однієї з живильних напруг.

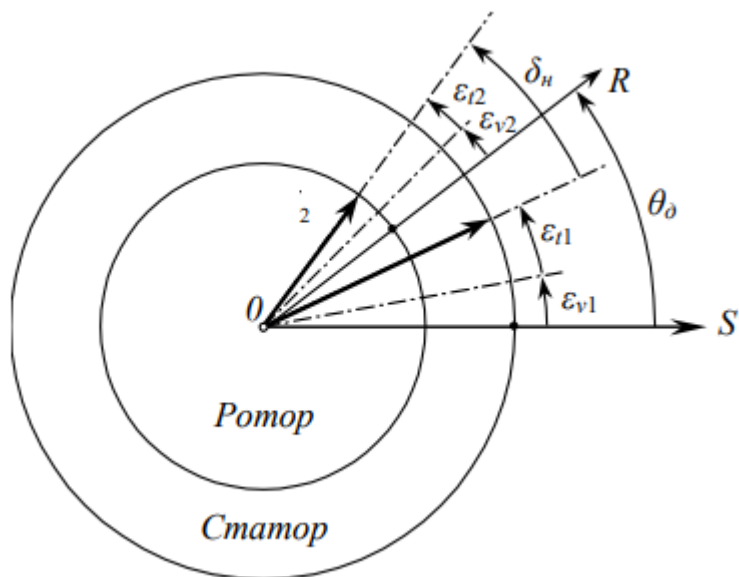


Рисунок 2.6 – Власні координати обмоток

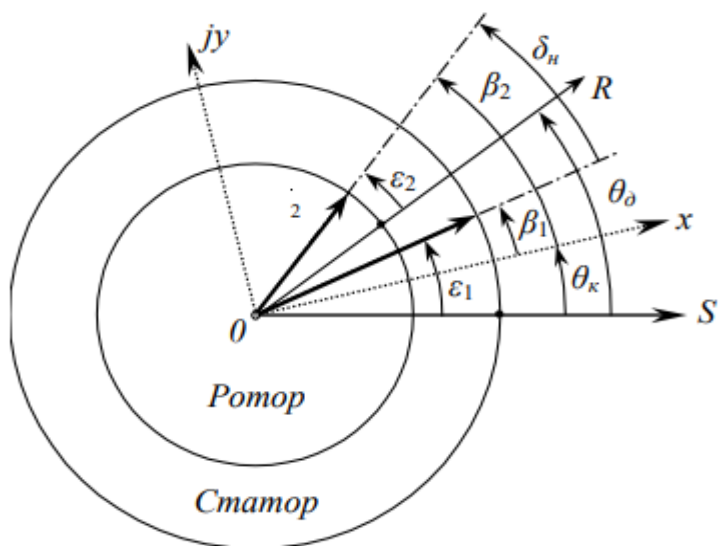


Рисунок 2.7 - Обертвий момент двигуна, що виражається як похідна електромагнітної енергії за кутом повороту

У багатьох випадках, особливо при виконанні розрахунків та проведенні аналітичних викладок, доцільно застосовувати систему відносних одиниць, яка надає математичній моделі двигуна подвійного живлення низку важливих переваг.

1. Використання параметрів та результатів розрахунків у відносних одиницях дозволяє надати моделі узагальнений характер, що не прив'язаний до конкретного типу або конструкції двигуна. Такий підхід дає змогу відобразити типові властивості та поведінкові тенденції цілої групи електричних машин, що значно розширює сферу застосування моделі.
2. Представлення змінних у відносних одиницях забезпечує більш наочну оцінку відповідності або відхилення процесів від номінального режиму роботи. Це особливо корисно при аналізі динаміки системи, оскільки дозволяє швидко і точно ідентифікувати критичні точки або нестабільні режими.
3. Більшість розрахункових величин у відносних одиницях мають порівнянний порядок значень, що сприяє зменшенню похибок округлення та підвищенню точності обчислень. Крім того, це полегшує виконання математичних операцій із змінними різного масштабу, що є важливим при реалізації алгоритмів на цифрових платформах.

Водночас слід зазначити, що застосування системи відносних одиниць ускладнюється при аналізі процесів у повній електроприводній системі (ЕС). Це пов'язано з необхідністю введення великої кількості базисних величин для кожної змінної, яка використовується в окремих функціональних блоках ЕП. Через це відносні одиниці використовуються переважно для аналізу характеристик окремого двигуна подвійного живлення, тоді як для дослідження процесів у повній електроприводній системі доцільно застосовувати модель у фізичних одиницях, що забезпечує більшу точність і відповідність реальним параметрам.

Таким чином, математична модель двигуна подвійного живлення, представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь, може бути зручно

записана у векторній формі з використанням відносних одиниць у синхронній системі координат, яка обертається зі швидкістю одного з живильних векторів напруги.

Такий формат подання дозволяє не лише спростити структуру рівнянь, але й забезпечити уніфіковане представлення електромагнітних процесів, що відбуваються в обмотках двигуна. Крім того, використання векторної форми в синхронних координатах сприяє зручності подальшого аналізу, а також ефективному синтезу алгоритмів керування, особливо при реалізації на цифрових обчислювальних платформах, таких як мікроконтролери або DSP.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{\psi}_1}{dt} = -(\alpha_1 + j\omega_1)\bar{\psi}_1 + \alpha_1 k_2 \bar{\psi}_2 + \bar{u}_1; \\ \frac{d\bar{\psi}_2}{dt} = -[\alpha_2 + j(\omega_1 - \omega_o)]\bar{\psi}_2 + \alpha_2 k_1 \bar{\psi}_1 + \bar{u}_2; \\ M = \frac{L_m}{J\sigma L_1 L_2} \text{Im} \left[\bar{\psi}_1 \dot{\bar{\psi}}_2 \right], \end{array} \right. \quad (2.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{1x}}{dt} = -\alpha_1 \psi_{1x} + \omega_1 \psi_{1y} + \alpha_1 k_2 \psi_{2x} + u_{1x}; \\ \frac{d\psi_{1y}}{dt} = -\omega_1 \psi_{1x} - \alpha_1 \psi_{1y} + \alpha_1 k_2 \psi_{2y} + u_{1y}; \\ \frac{d\psi_{2x}}{dt} = \alpha_2 k_1 \psi_{1x} - \alpha_2 \psi_{2x} + (\omega_1 - \omega_o) \psi_{2y} + u_{2x}; \\ \frac{d\psi_{2y}}{dt} = \alpha_2 k_1 \psi_{1y} - (\omega_1 - \omega_o) \psi_{2x} - \alpha_2 \psi_{2y} + u_{2y}; \\ M = \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} (\psi_{1y} \psi_{2x} - \psi_{1x} \psi_{2y}). \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Запропонована математична модель використовується в подальших розрахунках як базова основа для побудови спрощеного та лінеаризованого математичного опису роботи двигуна подвійного живлення (2.4). Її застосування дозволяє сформулювати узагальнене уявлення про динаміку системи, що значно полегшує аналітичний аналіз та синтез алгоритмів керування.

Завдяки структурованості та узагальненості цієї моделі, вона слугує відправною точкою для переходу до більш простих формулювань, які зручні для реалізації на цифрових обчислювальних пристроях, таких як мікроконтролери або сигнальні процесори. Крім того, лінеаризований варіант моделі дозволяє ефективно оцінювати поведінку системи в околі робочої точки, що є важливим для забезпечення стабільності та точності керування.

2.6. Спрощена нелінійна модель ДПЖ

Метою спрощення математичної моделі є досягнення максимальної зручності для проведення подальших аналітичних досліджень, а також скорочення часу, необхідного для моделювання електромеханічної системи. Крім того, спрощення сприяє покращенню візуального сприйняття результатів, що, своєю чергою, дозволяє більш ефективно виявляти загальні закономірності, необхідні для розробки системи керування електроприводом.

У випадку одноканального керування, коли змінюється лише одне з живильних напруг, можна знехтувати перехідними процесами в тій обмотці, напруга якої залишається незмінною. Це дає змогу знизити порядок системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку двигуна. Доцільність такого спрощення підтверджується результатами моделювання, проведеного на основі повної математичної моделі, зокрема при різким змінювань частоти напруги другої обмотки за умови сталих параметрів напруги першої обмотки.

Крім того, при коливаннях кутової швидкості та кута навантаження потокозчеплення першої обмотки змінюються незначно, що дозволяє зробити висновок про можливість подальшого спрощення моделі без суттєвого впливу на її точність. Такий підхід є особливо корисним при реалізації системи керування на мікроконтролерах або інших цифрових пристроях, де важливо забезпечити швидкодію та стабільність обчислень.

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\bar{\psi}_2}{dt} &= \left\{ \alpha_2 \left[1 - \frac{\alpha_1^2 k_1 k_2}{\alpha_1^2 + \omega_{10}^2} \right] + j \left[\left(1 + \frac{\alpha_1 \alpha_2 k_1 k_2}{\alpha_1^2 + \omega_{10}^2} \right) \omega_{10} - \omega_o \right] \right\} \bar{\psi}_2 + \left[\frac{\alpha_1 \alpha_2 k_1}{\alpha_1^2 + \omega_{10}^2} - j \frac{\alpha_2 k_1 \omega_{10}}{\alpha_1^2 + \omega_{10}^2} \right] \bar{U}_{10} + \bar{u}_2; \\ M &= \frac{L_w}{\sigma L_1 L_2} \operatorname{Im} \left\{ \frac{\alpha_1 - j \omega_{10}}{\alpha_1^2 + \omega_{10}^2} \bar{U}_{10} \dot{\bar{\psi}}_2 - j \frac{\alpha_1 k_2 \omega_{10}}{\alpha_1^2 + \omega_{10}^2} |\bar{\psi}_2|^2 \right\}. \end{aligned} \right. \quad (2.5)$$

У проєкціях на осі [x, y] модель ДПЖ за умови сталості параметрів живильної напруги другої обмотки \bar{u}_2 має вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\psi_{1x}}{dt} &= -\alpha_1 \left[1 - \frac{\alpha_2^2 k_1 k_2}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_o)^2} \right] \psi_{1x} + \left[\omega_1 + \frac{\alpha_1 \alpha_2 k_1 k_2 (\omega_1 - \omega_o)}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_o)^2} \right] \psi_{1y} + \\ &+ \frac{\alpha_1 \alpha_2 k_2}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_o)^2} U_{2x0} + \frac{\alpha_1 k_2 (\omega_1 - \omega_o)}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_o)^2} U_{2y0} + u_{1x}; \\ \frac{d\psi_{1y}}{dt} &= - \left[\omega_1 + \frac{\alpha_1 \alpha_2 k_1 k_2 (\omega_1 - \omega_o)}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_o)^2} \right] \psi_{1x} - \alpha_1 \left[1 - \frac{\alpha_2^2 k_1 k_2}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_o)^2} \right] \psi_{1y} - \\ &- \frac{\alpha_1 k_2 (\omega_1 - \omega_o)}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_o)^2} U_{2x0} + \frac{\alpha_1 \alpha_2 k_2}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_o)^2} U_{2y0} + u_{1y}; \\ M &= \frac{L_w}{\sigma L_1 L_2 [\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_o)^2]} \left\{ [(\omega_1 - \omega_o) U_{2x0} - \alpha_2 U_{2y0}] \psi_{1x} + \right. \\ &\left. [(\omega_1 - \omega_o) U_{2y0} + \alpha_2 U_{2x0}] \psi_{1y} + \alpha_2 k_1 (\omega_1 - \omega_o) (\psi_{1x}^2 + \psi_{1y}^2) \right\}. \end{aligned} \right. \quad (2.6)$$

З метою оцінки похибки, яка виникає внаслідок спрощення нелінійної математичної моделі, було проведено моделювання електромеханічних процесів у двигуні подвійного живлення за умов різкого змінювання частоти живильної напруги другої обмотки — з 0,1 до 0,3 відносних одиниць частоти.

Аналіз отриманих результатів показав, що похибка, спричинена застосуванням спрощеної моделі, є незначною: для миттєвих значень кутової швидкості вона становить менше 3%, а для значень кута навантаження — менше 8%. Крім того, періоди коливань перехідних процесів, отримані за повною та спрощеною моделями, практично збігаються, що свідчить про достатню точність спрощеного математичного опису для подальшого використання в системах керування.

Такі результати підтверджують доцільність застосування спрощеної нелінійної моделі в інженерних розрахунках, особливо в тих випадках, коли необхідно забезпечити швидкодію та ефективність обчислень без суттєвих втрат точності.

Для чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку нелінійної моделі, доцільно застосовувати метод Рунге-Кутти четвертого порядку, який є одним із найбільш поширених і ефективних методів інтегрування. Цей підхід дозволяє з високою точністю обчислювати значення змінних у дискретних точках, що особливо важливо при моделюванні складних електромеханічних процесів у системах типу ДПЖ та ЕП.

Загальний вигляд задачі має форму:

$$y' = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0.$$

де y' — похідна функції y за змінною x , а y_0 — початкове значення функції в точці x_0 .

Для обчислення наближеного значення функції y у наступній точці використовується ітераційна формула з фіксованим кроком h :

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + k_2 + k_3 + k_4), \quad (2.7)$$

де коефіцієнти K_1, K_2, K_3 та K_4 визначаються послідовно за такими виразами:

$$\begin{aligned} K_1 &= f(x_n, y_n), \\ K_2 &= f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}K_1\right), \\ K_3 &= f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}K_2\right), \\ K_4 &= f(x_n + h, y_n + hK_3). \end{aligned} \quad (2.8)$$

Цей алгоритм дозволяє з високою точністю наближати розв'язки нелінійних рівнянь, що виникають при моделюванні електроприводів, і є придатним для реалізації на цифрових обчислювальних пристроях, таких як мікроконтролери або сигнальні процесори.

Розв'язання систем диференціальних рівнянь методом Рунге–Кутти є одним із найпоширеніших чисельних підходів, який широко використовується в технічних галузях, зокрема при моделюванні електромеханічних процесів. Цей метод має численні реалізації, доступні у вигляді готових програмних модулів на різних мовах програмування, а також інтегрований у багато сучасних програмних засобів для математичного моделювання.

Зазначений алгоритм належить до методів четвертого порядку точності, що означає: сумарна похибка на кінцевому інтервалі інтегрування має порядок $O(h^4)$, де h — крок інтегрування. Такий рівень точності є достатнім для більшості інженерних задач, однак у випадках, коли необхідна підвищена точність обчислень, все частіше застосовуються методи п'ятого або шостого порядку.

Разом із тим, побудова чисельних схем вищого порядку точності супроводжується значними обчислювальними труднощами, оскільки потребує більш складних алгоритмів і збільшення обсягу обчислень. Особливо це актуально при реалізації методів на операційних системах реального часу, де вимоги до швидкодії та часу відгуку системи є критичними. У таких випадках можливість використання методів з високим порядком точності зменшується пропорційно до обмежень, пов'язаних із допустимим часом обробки даних.

3 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

3.1 Опис використаної установки

Елементна база, що використовується для реалізації поставленої задачі, являє собою комплексне програмно-апаратне рішення, до складу якого входить об'єкт дослідження — індукторний електропривод подвійного живлення. Цей електропривод включає в себе індукторну машину подвійного живлення (ІМПЖ), цифровий датчик для вимірювання кутового положення, датчики струму, силові модулі інверторів, а також механічне навантаження, що імітує робочі умови системи.

Для побудови та реалізації програмно-апаратного комплексу було обрано модульну платформу NI PXI-1042, розроблену компанією National Instruments (NI). Зазначена платформа забезпечує гнучкість конфігурації, оскільки дозволяє змінювати свою структуру шляхом додавання або заміни окремих модулів відповідно до специфічних вимог користувача. Крім того, вона характеризується високою продуктивністю, що дає змогу ефективно обробляти великі обсяги даних у режимі реального часу.

У складі платформи NI PXI-1042 використовується вбудований контролер NI PXI-8106RT, який постачається з попередньо встановленою операційною системою реального часу. Це забезпечує можливість створення високоточних систем вимірювання та керування, що є критично важливим для дослідження динаміки електроприводів та реалізації алгоритмів керування в умовах, наближених до реальних. Контролер NI PXI-8106RT, інтегрований у платформу PXI-1042, взаємодіє з шиною PXI, яка є вдосконаленою версією комп'ютерної шини PCI. Така архітектура забезпечує високу швидкість обміну даними між модулями, встановленими в шасі, що дозволяє реалізувати складні алгоритми керування та збору даних у режимі реального часу.

У складі комплексу використовується багатофункціональний модуль введення/виведення NI PXI-7833R, який реалізовано на базі програмованої логічної інтегральної схеми (FPGA). Цей модуль має у своєму розпорядженні 8 аналогових каналів для введення, 8 аналогових каналів для виведення, а також

96 цифрових ліній введення/виведення, що забезпечує широкі можливості для підключення датчиків, виконавчих пристроїв та інших елементів системи.

Для розробки схем керування та збору даних, що реалізуються на модулі NI PXI-7833R, використовується програмне середовище графічного програмування LabVIEW, зокрема його спеціалізований компонент LabVIEW FPGA. Це дозволяє створювати високопродуктивні та гнучкі рішення, адаптовані до конкретних вимог дослідницької установки, а також забезпечує зручність візуального налаштування логіки роботи системи без необхідності використання текстових мов програмування.

Таким чином, обрана апаратна платформа у поєднанні з програмними засобами National Instruments дозволяє реалізувати ефективну систему керування електроприводом, здатну працювати в реальному часі з високою точністю та надійністю.

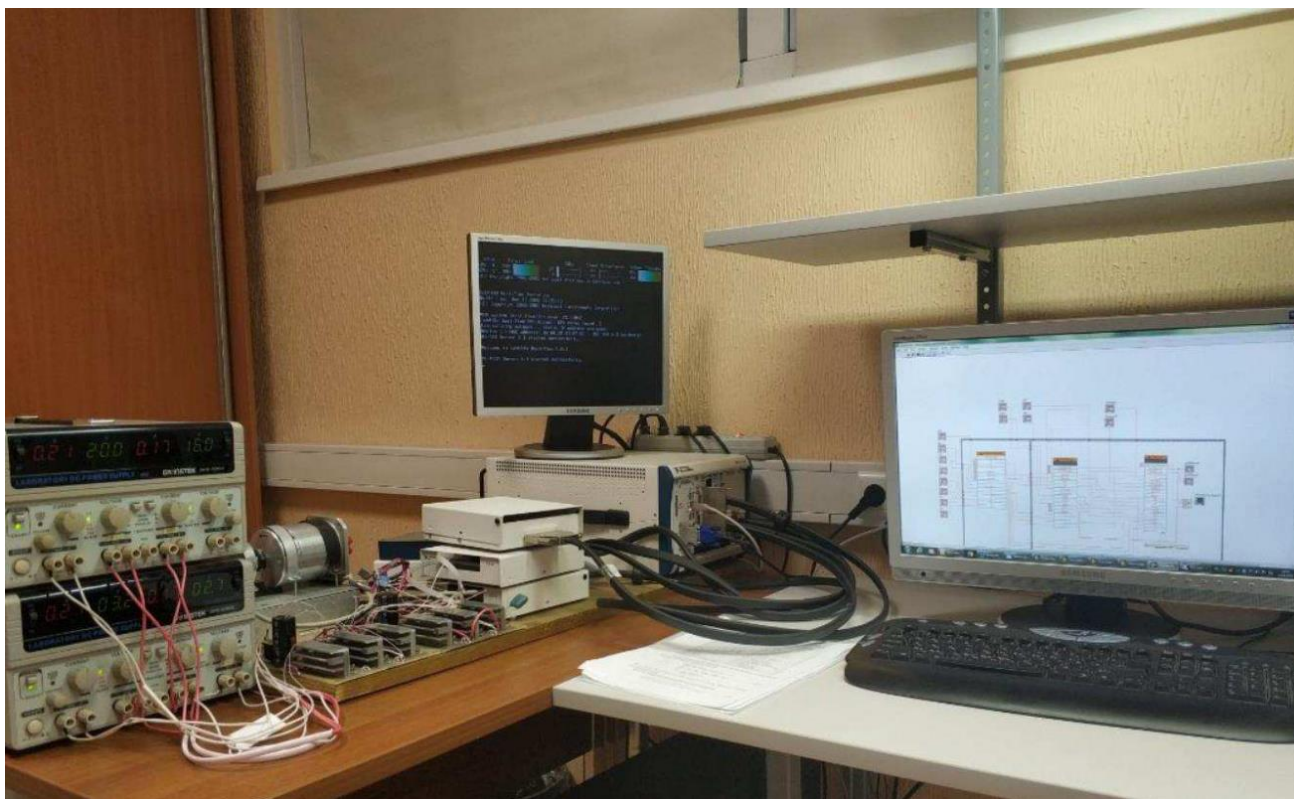


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд системи

На рисунку 3.1 представлено зовнішній вигляд дослідної системи, яка використовується для реалізації та тестування алгоритмів керування

електроприводом. Розроблене програмне забезпечення, створене у середовищі графічного програмування LabVIEW, має модульну структуру та складається з кількох взаємопов'язаних компонентів.

Ці програмні модулі розміщені на різних апаратних рівнях системи: частина з них функціонує на персональному комп'ютері оператора, інші — на вбудованому контролері NI PXI-8106RT, а також на модулі введення/виведення NI PXI-7833R.

Такий розподіл дозволяє забезпечити ефективну взаємодію між елементами системи, оптимізувати обробку даних у реальному часі та реалізувати складні функції керування з високою точністю.

Завдяки використанню середовища LabVIEW, програмне забезпечення має зручний інтерфейс для налаштування, візуалізації та моніторингу параметрів, що значно спрощує процес розробки, налагодження та експлуатації системи керування електроприводом.

3.2 Програмне забезпечення установки

Основну частину програмного забезпечення, що використовується для реалізації системи керування, становлять програмні продукти, розроблені компанією National Instruments. З метою здійснення діагностики, а також налаштування як апаратної частини, так і програмного компонента системи, компанія National Instruments пропонує спеціалізоване програмне забезпечення під назвою Measurement & Automation Explorer (MAX).

Цей програмний інструмент забезпечує користувача широкими можливостями для конфігурації обладнання, перевірки його працездатності та інтеграції з іншими елементами системи. Крім того, у середовищі Measurement & Automation Explorer доступні додаткові програмні модулі, які використовуються для розширення функціональних можливостей як самої системи керування, так і окремих пристроїв та інтерфейсів, що підключаються до неї. Завдяки цьому забезпечується гнучкість налаштувань і масштабованість системи відповідно до конкретних вимог користувача.

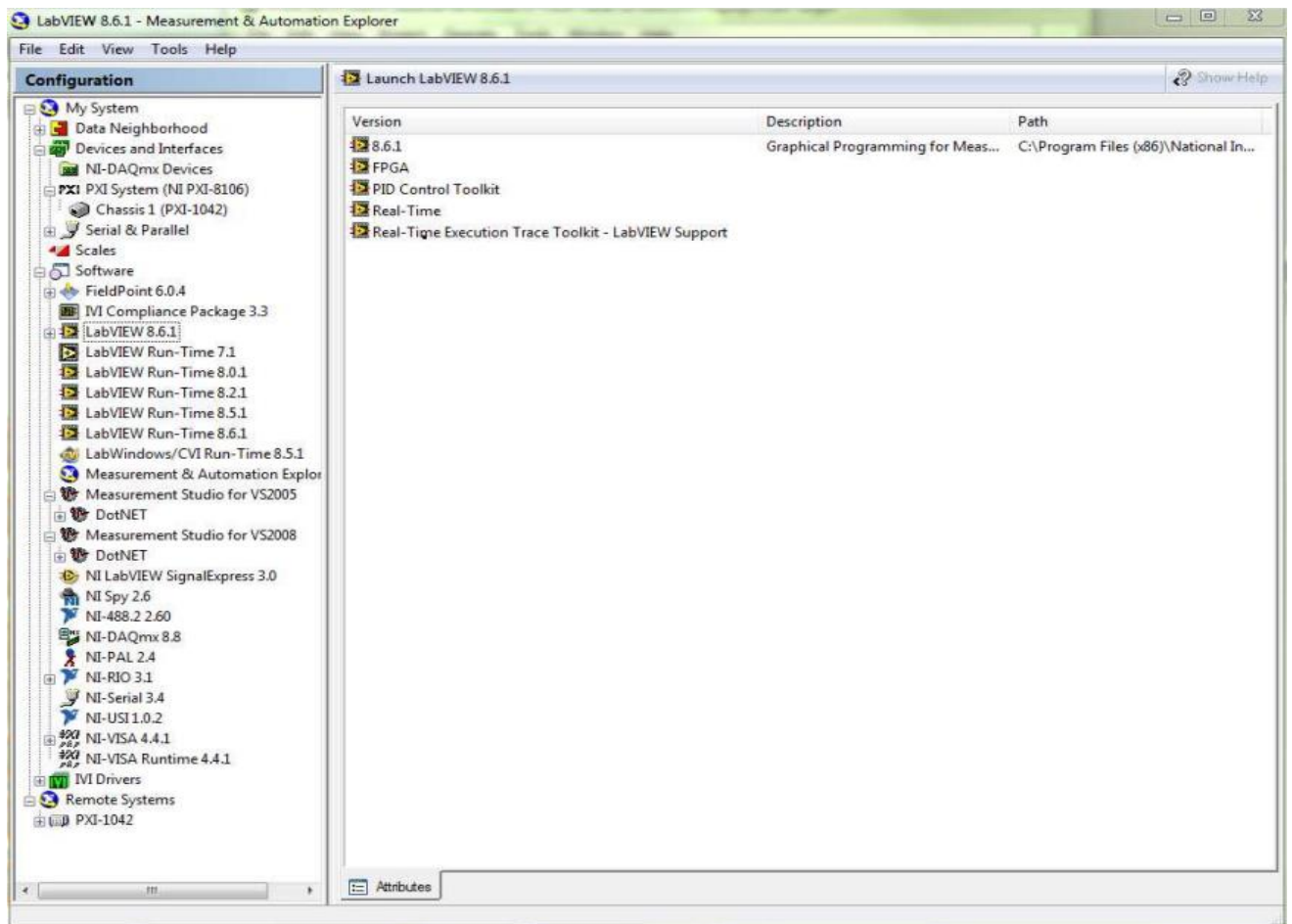


Рисунок 3.2 – Measurement & Automation Explorer

Розроблене програмне забезпечення реалізовано у вигляді єдиного інтегрованого проекту, який складається з комплексу взаємопов'язаних віртуальних інструментів. Ці інструменти розміщені на різних апаратних рівнях системи: частина функціонує на персональному комп'ютері оператора, інші — на контролері реального часу PXI, а також на модулі введення/виведення 7833-R, побудованому на базі програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС).

Для розширення функціональних можливостей комплексу та реалізації обчислювальних алгоритмів додатково використовується інтегроване середовище розробки Microsoft Visual Studio. Воно необхідне для створення динамічно підключуваної бібліотеки (DLL), яка містить реалізацію алгоритму чисельного розрахунку математичної моделі динамічного об'єкта — двигуна подвійного живлення (ДПЖ). Ця модель представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь, що інтегруються за допомогою методу Рунге–Кутти,

який забезпечує високу точність обчислень при моделюванні складних електромеханічних процесів [4].

Застосування такого підходу дозволяє ефективно поєднувати апаратні ресурси з програмними засобами, забезпечуючи гнучкість, масштабованість та точність у реалізації системи керування електроприводом.

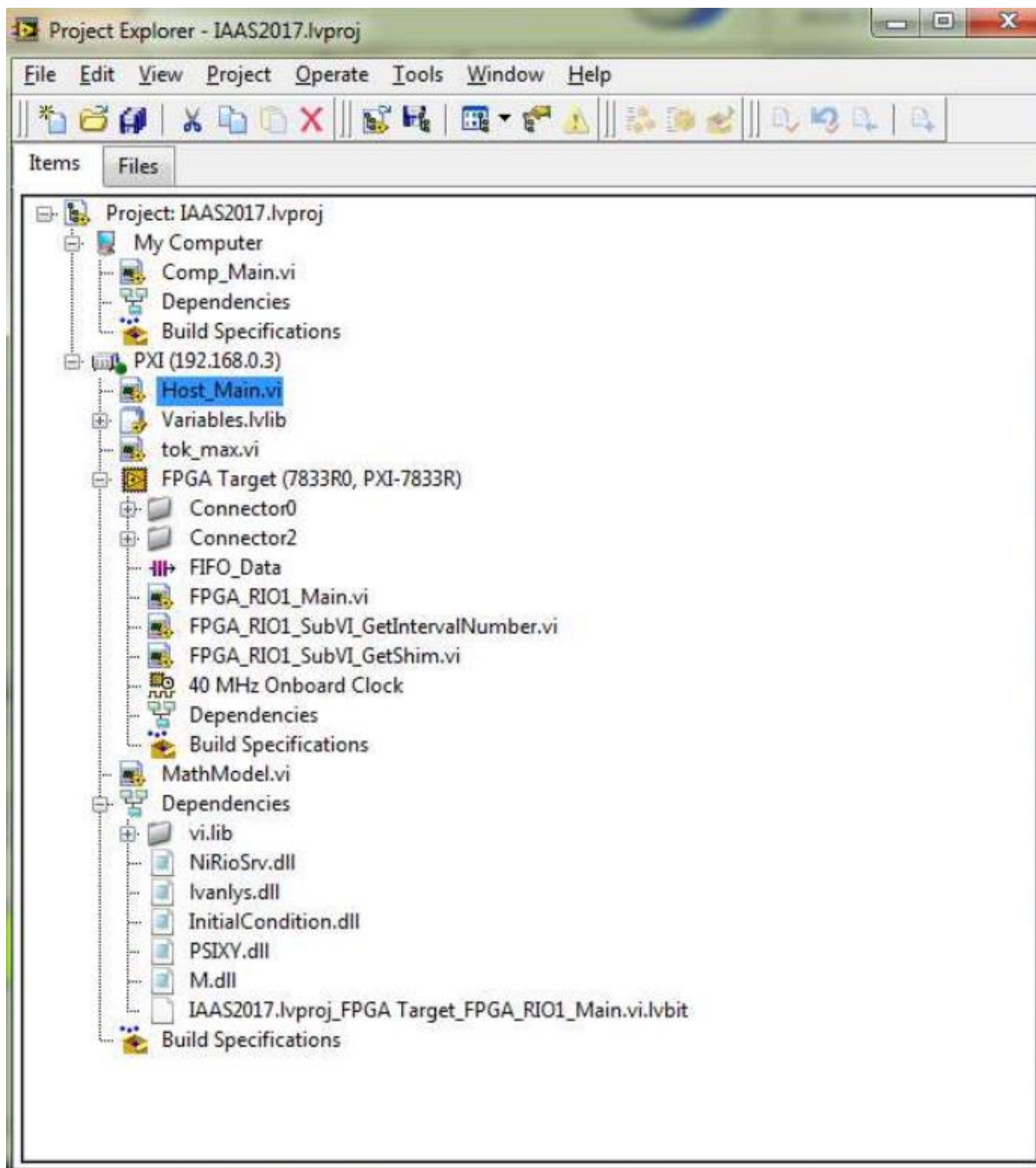


Рисунок 3.3 – Оглядач проєкту

Кожен із віртуальних інструментів, що використовуються в рамках даного проєкту, має унікальні функціональні властивості та виконує специфічні завдання в межах загальної системи керування. Структура проєкту включає наступний набір віртуальних інструментів:

1. `Comp_Main.vi` — цей віртуальний інструмент розміщується на персональному комп'ютері оператора. Його основне призначення полягає у завантаженні експериментальних даних, отриманих із контролера, їх подальшій обробці, аналізі та збереженні у відповідному форматі для подальшого використання.
2. `Host_Main.vi` — інструмент, що функціонує на контролері реального часу NI PXI-8106 RT. Він відповідає за формування сигналів широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) у режимі реального часу, а також за приймання інформації з датчиків, що забезпечує оперативне реагування системи на зміну параметрів.
3. `Math Model` — віртуальний інструмент, який використовується для реалізації математичної моделі об'єкта керування. Він виконує обчислення в реальному часі, що дозволяє моделювати динаміку системи на основі диференціальних рівнянь.
4. `FPGA_RIO1_Main.vi` — цей інструмент розміщується на модулі введення/виведення NI PXI-7833R, побудованому на базі програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС). У межах цього модуля здійснюється формування керуючих сигналів для транзисторних ключів інверторів, оцифровка аналогових сигналів, що надходять із датчиків струму, а також приймання даних із цифрового датчика положення.
5. `FPGA_RIO1_SubVI_GetIntervalNumber.vi` — допоміжний віртуальний інструмент, який використовується як частина бібліотеки в складі `FPGA_RIO1_Main.vi`. Його функція полягає у виборі імпульсів, що відповідають певним часовим інтервалам.
6. `FPGA_RIO1_SubVI_GetShim.vi` — ще один допоміжний інструмент, який також інтегрується у `FPGA_RIO1_Main.vi`. Він відповідає за формування

імпульсів широтно-імпульсної модуляції, необхідних для керування силовими елементами системи.

7. FPGA_RIO1_SubVI_GetSensorShim.vi — віртуальний інструмент, призначений для визначення тривалості імпульсу, що використовується при передачі даних від датчика положення. Це дозволяє точно синхронізувати сигнали та забезпечити коректну інтерпретацію положення ротора.

Взаємозв'язок між усіма компонентами програмно-апаратного комплексу представлено у вигляді діаграми компонентів, що наведена на рисунку 3.4. Така структурна організація забезпечує узгоджену роботу всіх елементів системи та дозволяє реалізувати складні алгоритми керування електроприводом у реальному часі.

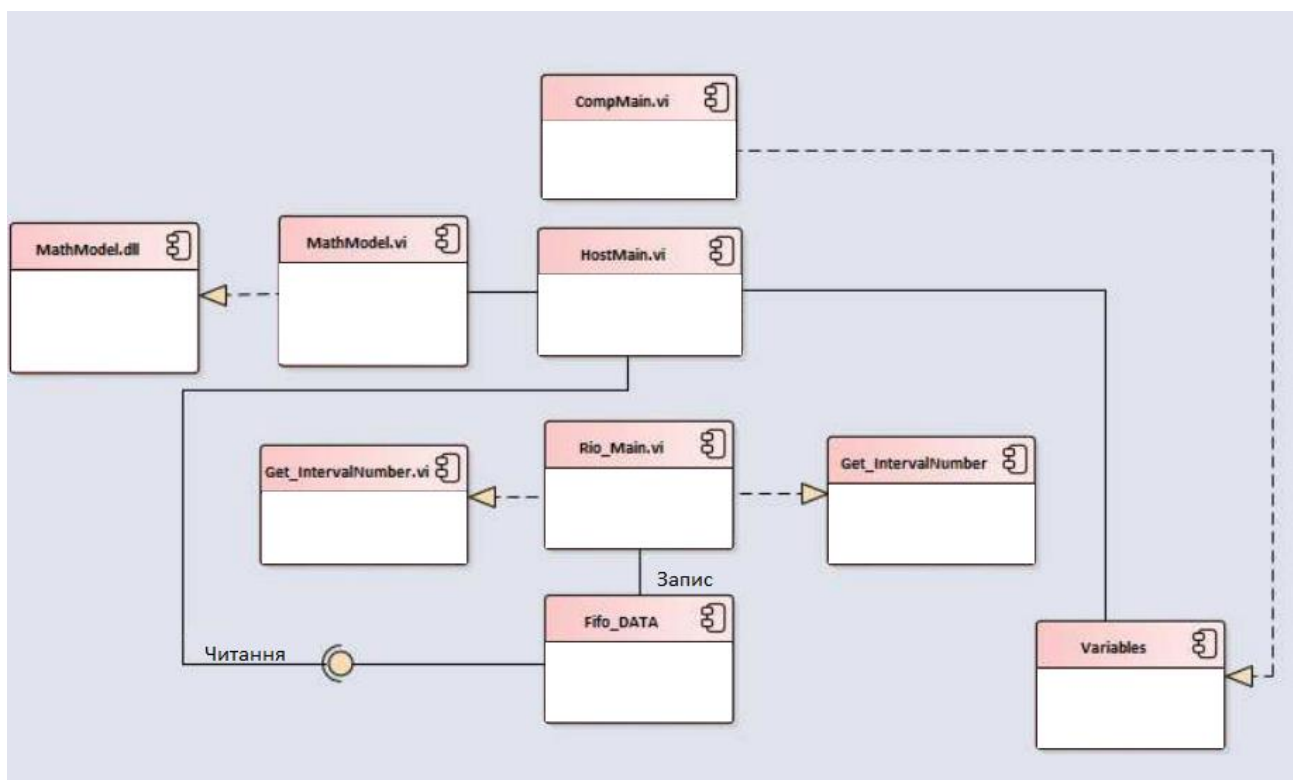


Рисунок 3.4 – Діаграма компонентів

Динамічно підключувані бібліотеки, які відображаються в блоці Dependencies (Залежності) оглядача проєкту, були розроблені мовою програмування C. Вони відіграють ключову роль у реалізації алгоритмів

чисельного розрахунку математичної моделі, що описує поведінку динамічного об'єкта — двигуна подвійного живлення.

Хоча ці бібліотеки фізично зберігаються на персональному комп'ютері, на якому встановлено середовище LabVIEW, під час виконання програми вони фактично використовуються на рівні контролера в режимі реального часу. Такий підхід дозволяє забезпечити високу швидкодію та точність обчислень без перевантаження центрального процесора ПК, що особливо важливо для систем, які працюють у динамічних умовах.

Інтерфейс, з яким безпосередньо взаємодіє користувач, реалізовано у вигляді віртуального інструмента, що функціонує на контролері реального часу. Цей інструмент має назву Host_Main.vi і забезпечує доступ до основних параметрів системи, дозволяє здійснювати моніторинг, керування та налаштування режимів роботи електропривода.

3.3 Основні технічні рішення, що використовуються під час створення віртуальних приладів

Візуалізація та контроль інформації, яка надходить до оператора, реалізовані за допомогою віртуального інструмента Host_Main.vi. Саме цей модуль забезпечує інтерфейс для взаємодії користувача з системою керування електроприводом у реальному часі.

Для запуску та коректної роботи програми Host_Main.vi необхідно задати низку початкових параметрів, які визначають режим функціонування системи. До таких параметрів належать: задана частота сигналу, початкове значення амплітуди, кількість підінтервалів у межах одного інтервалу, величина фазового зсуву, а також амплітуда, виражена у відносних одиницях (у діапазоні від 1 % до 100 %). Усі ці значення задаються окремо для кожної з двох груп обмоток, що дозволяє гнучко налаштовувати систему під конкретні умови експерименту.

На етапі розрахунку первинних значень для кожної групи обмоток виконується обчислення таких параметрів:

- 1) загальна кількість підінтервалів;

- 2) кількість тіків у межах одного підінтервалу, що визначається за відповідною формулою та округлюється шляхом перетворення змінної $temp$ у ціле число;
- 3) фактичне значення частоти, яке використовується для генерації керуючих сигналів.

Для реалізації фазового зсуву використовується алгоритм, представлений у вигляді блоку Formula Node. У цей блок надходять вхідні дані, що включають значення фазового зсуву для першої та другої групи обмоток (Фазовий зсув №1 і №2), а також параметри, пов'язані з початком і завершенням відліку (перша точка відліку та зміщення від початку). На основі цих даних формуються змінні, які використовуються для керування шиною FPGA: Shift1_1...Shift1_3 — для першої групи обмоток, Shift2_1...Shift2_3 — для другої.

Формування таблиці імпульсів ШІМ здійснюється у межах блоку For Loop, на вхід якого подаються наступні параметри:

- 1) кількість інтервалів, що визначає загальну тривалість циклу;
- 2) кількість градусів у межах підінтервалу позитивної півхвилі сигналу, що використовується для побудови амплітудного профілю.
- 3) кількість градусів у межах одного підінтервалу періоду;
- 4) початкова амплітуда сигналу.

Загальна кількість ітерацій відповідає числу підінтервалів, на які поділено період сигналу. У межах відповідного програмного блоку здійснюється покроковий розрахунок ширини імпульсів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Алгоритм обчислення реалізується за наступною послідовністю:

1. На першому етапі визначається поточне значення кількості градусів у межах підінтервалу. Для цього кількість градусів у підінтервалі періоду множиться на номер поточної ітерації.
2. Далі виконується додавання отриманого значення до кількості градусів, що відповідає половині позитивної півхвилі сигналу. Це дозволяє врахувати фазову структуру сигналу при формуванні імпульсу.

3. На основі отриманого результату здійснюється перетворення градусів у радіани, що необхідно для подальшого обчислення значення синуса, яке використовується як основа для формування амплітудного профілю сигналу.
4. Значення синуса множиться на амплітуду, яка була задана як початковий параметр, що дозволяє врахувати масштаб сигналу відповідно до умов експерименту.
5. Після округлення результату виконується додаткове масштабування — значення множиться на коефіцієнт, що відповідає бажаній амплітуді сигналу у відносних одиницях.

Сформований масив значень ширини імпульсів ШІМ для кожного підінтервалу передається у змінні `ShimTicks1` та `ShimTicks2`. Перед цим дані конвертуються у формат беззнакового 32-бітного цілого числа (`unsigned 32-bit integer`), що забезпечує їх коректну обробку у наступних етапах виконання підпрограми.

Перелік змінних, що використовуються в алгоритмі, а також їх функціональне призначення наведено у таблиці 3.1, яка дозволяє чітко структурувати логіку роботи програмного блоку.

Таблиця 3.1 – Перелік використаних змінних.

Змінна	Опис
Shift_1_1	Зсув по першій фазі для першої групи обмоток
Shift_1_2	Зсув по другій фазі для першої групи обмоток
Shift_1_3	Зсув по третій фазі для першої групи обмоток
Intervals_1	Кількість інтервалів для першої групи обмоток
SubIntervals_1	Кількість підінтервалів для першої групи обмоток
SubInterval_Ticks_1	Кількість тиків у першому підінтервалі для першої групи обмоток
Shim_Ticks_1	Масив ширини ШІМ у підінтервалах для першої групи обмоток
Shift_2_1	Зсув по першій фазі для другої групи обмоток
Shift_2_2	Зсув по другій фазі для другої групи обмоток
Shift_2_3	Зсув по третій фазі для другої групи обмоток
Intervals_2	Кількість інтервалів для другої групи обмоток
SubIntervals_2	Кількість підінтервалів для другої групи обмоток
Shim_Ticks_2	Масив ширини ШІМ у підінтервалах для другої групи обмоток
SubInterval_Ticks_2	Кількість тиків у першому підінтервалі для другої групи обмоток

Запис усіх перелічених змінних, необхідних для роботи підпрограми, здійснюється за допомогою блоку Read/Write Control, який передає дані до функціонального модуля FPGA_RIO0_Main.vi. Для того щоб цей блок міг коректно передати інформацію до цільового віртуального інструмента FPGA, необхідно попередньо встановити посилання на відповідний інтерфейс — FPGA VI Reference In. У межах даної підпрограми це посилання задається перед початком обчислювальних операцій, що забезпечує правильну ініціалізацію та доступ до ресурсів FPGA.

Для забезпечення узгодженої роботи між підпрограмами, що виконуються на FPGA та Host-рівні, необхідно реалізувати механізм синхронізації. Це дозволяє уникнути помилок при передачі даних між модулями. З цією метою у першому кадрі структури Flat Sequence Structure розміщується компонент Wait, який забезпечує затримку, необхідну для стабілізації процесу обміну даними.

У другому кадрі цієї ж структури виконується зчитування змінних, які були попередньо задані у модулі Host.vi. Ці змінні, як правило, представлені у вигляді таблиці, що містить параметри керування. Після завершення операції зчитування, модуль FPGA за допомогою блоку Interrupt формує запит на переривання. Конфігурація цього блоку налаштована таким чином, щоб очікувати підтвердження обробки запиту від модуля Host_Main.vi, що забезпечує двосторонню синхронізацію.

Крім того, у другому кадрі структури Flat Sequence Structure розміщується цикл While Loop, у межах якого реалізовано логіку роботи блоків селектора та формування імпульсів. Ці блоки виконуються відповідно до послідовності, визначеної у першому та другому кадрі, що дозволяє забезпечити стабільну генерацію керуючих сигналів у реальному часі.

У першому кадрі структури Flat Sequence Structure розміщується таймер циклу (Loop Timer), який відповідає за регулювання тривалості виконання операцій у межах одного проходу циклу. Його функція полягає у забезпеченні стабільного ритму роботи системи, що особливо важливо для точного формування імпульсів у реальному часі.

Сигнали, які формуються на основі номера поточної ітерації та загальної кількості підінтервалів, генеруються за допомогою блоку Select. Якщо умова логічного порівняння виконується (тобто результат — True), формується сигнал зі значенням 0. У протилежному випадку (False) сигнал набуває значення, що відповідає номеру поточної ітерації. Ці сигнали передаються до користувачьких блоків GetIntervalNumber та GetShim, які відповідають за вибір підінтервалу та формування імпульсу ШІМ відповідно.

У другому кадрі структури розміщується формувач імпульсів широтно-імпульсної модуляції, який генерує сигнали відкриття та закриття транзисторних ключів інверторів. Крім того, тут розташовані блоки I/O Node, що відповідають за приймання сигналів від зовнішніх пристроїв, зокрема датчиків та виконавчих елементів.

Селектор імпульсів ШІМ реалізовано у вигляді віртуального інструмента FPGA_RIO1_SubVI_GetIntervalNumber.vi, який виконує логічне порівняння порядкового номера поточної ітерації з кількістю підінтервалів. Якщо номер ітерації перевищує або дорівнює кількості підінтервалів, формується логічний сигнал TRUE. У протилежному випадку — FALSE. Отриманий логічний сигнал конвертується у формат unsigned 8-bit integer, що дозволяє інтегрувати його у блок Compound Arithmetic для подальшої обробки.

Далі сформований сигнал підлягає додаванню з номером поточного інтервалу (In_Current_Interval), який за замовчуванням приймається рівним нулю, а також із величиною фазового зсуву (In_Shift). Після цього з отриманої суми віднімається загальна кількість інтервалів (In_Number_intervals), що дозволяє визначити актуальне положення сигналу в межах періоду.

У блоці Greater Or Equal? виконується логічне порівняння значення, отриманого з блоку Compound Arithmetic, із загальною кількістю інтервалів. Якщо умова порівняння виконується (тобто значення більше або дорівнює кількості інтервалів), то через блок Select передається логічне значення TRUE, яке записується у змінну Out_interval_Number. У випадку, якщо умова не

виконується, передається альтернативне значення — результат обчислення з блоку Compound Arithmetic.

Змінна `Out_interval_Number` приймає значення у форматі `unsigned 8-bit integer`, що дозволяє використовувати її як інтервал, актуальний на поточний момент часу в системі керування.

Формування імпульсів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) здійснюється за допомогою віртуального інструмента `FPGA_RIO1_SubVI_GetShim.vi`, який реалізує логіку генерації сигналів відкриття та закриття транзисторних ключів.

Поточне значення лічильника підінтервалів порівнюється з половиною різниці між загальною кількістю підінтервалів та кількістю підінтервалів, що відповідають позитивній півхвилі сигналу. Якщо лічильник менший за це значення, то блок `Greater` формує логічний сигнал `TRUE`, в іншому випадку — `FALSE`.

Крім того, лічильник підінтервалів порівнюється за допомогою блоку `Less` із сумою кількості підінтервалів позитивної півхвилі та половини загальної кількості підінтервалів. Якщо поточне значення менше цієї суми, формується сигнал `TRUE`, інакше — `FALSE`. Така логіка дозволяє точно визначати момент активації імпульсу ШІМ у межах заданого періоду.

Усі перелічені вище значення передаються до логічного блоку `AND`, який виконує операцію кон'юнкції, тобто логічного множення. Завдяки цьому формується центрований сигнал широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), що забезпечує симетричне керування транзисторними ключами інвертора. Для другої групи обмоток процес формування сигналу відбувається за аналогічною схемою, що гарантує узгоджене керування обома групами.

Отримання даних з цифрового датчика положення. У третьому кадрі структури `Flat Sequence Structure`, якщо рахувати від початку виконання програми, розміщується цикл `While`, який реалізує поетапне зчитування даних з датчиків. На першому рівні цього циклу, у першому кадрі, блок `I/O Node` отримує команду на зчитування значення кута положення ротора з цифрового датчика. У другому кадрі задається затримка, необхідна для завершення процесу

зчитування, що дозволяє уникнути помилок, пов'язаних із передчасним доступом до даних.

У третьому кадрі виконується зчитування аналогових сигналів з датчиків струму, які проходять через процес аналого-цифрового перетворення (АЦП). Після завершення операції лічильник повертає значення часу, витраченого на повний цикл зчитування, що дозволяє оцінити продуктивність системи та забезпечити її синхронізацію з іншими процесами керування. (Рис.3.5)

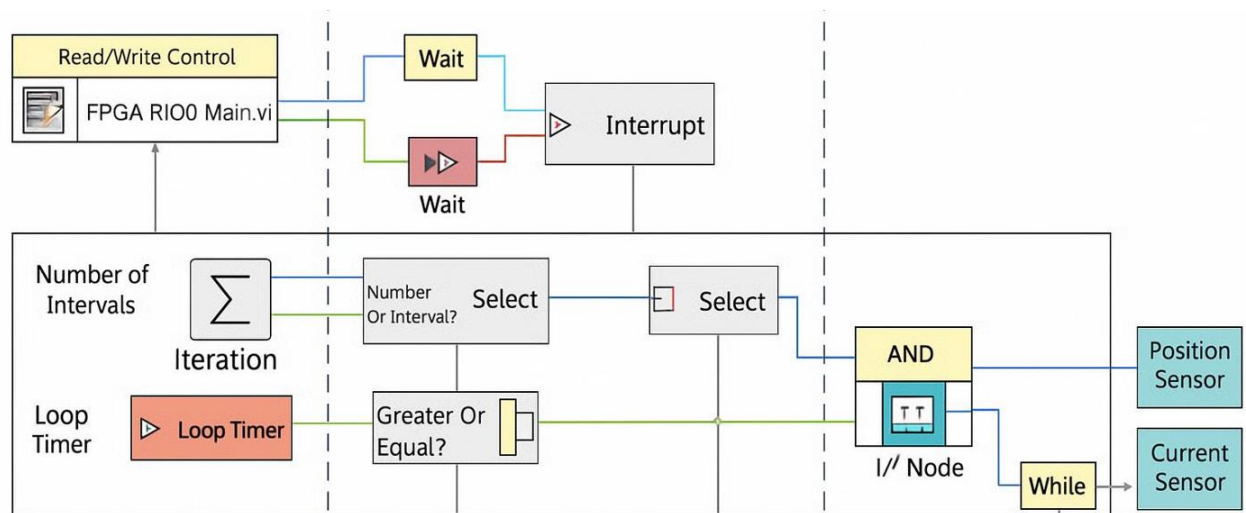


Рисунок 3.5 - Блок-схема роботи підпрограми FPGA та Host

У четвертому кадрі структури Flat Sequence Structure виконується повторне очікування завершення процесу зчитування кута положення ротора. Це необхідно для забезпечення коректності отриманих даних. У п'ятому кадрі відбувається очікування завершення процесу перетворення отриманого значення у формат, придатний для подальшої обробки. Після завершення цього етапу, у шостому кадрі ініціюється команда на видачу стартового байта, який слугує сигналом для початку нового циклу обміну даними.

Після завершення періоду, у шостому блоці структура переходить на вищий рівень, де знову надходить команда на зчитування кута положення — це забезпечує циклічність процесу та синхронізацію між окремими етапами.

На другому рівні структури Flat Sequence Structure розміщується цикл For Loop, у межах якого здійснюється зчитування значення кута з цифрового датчика

положення. Цей процес виконується відповідно до встановленої послідовності кадрів, що дозволяє забезпечити стабільність та точність отриманих даних.

У восьмому блоці структури Flat Sequence (який складається з чотирьох кадрів) реалізується повний цикл обміну: надходження команди на зчитування кута, очікування завершення операції, надходження команди на видачу стартового байта, та повторне очікування, необхідне для завершення передачі.

У межах циклу For Loop, якщо команда на видачу стартового байта не активується (тобто значення Clock дорівнює 0), у другому кадрі виконується очікування завершення виводу. Коли ж команда активується (Clock = 1), у четвертому кадрі відбувається подача сигналу на шину DATA, що дозволяє передати інформацію до наступного етапу обробки.

У п'ятому кадрі структури Flat Sequence Structure реалізується процес зчитування одного біта інформації з шини DATA, що є частиною цифрового обміну між модулями. У шостому кадрі відбувається очікування завершення операції зчитування, що дозволяє забезпечити коректність прийнятих даних.

Після отримання сигналу з шини DATA, він передається до блоку Replace Array Subset, який виконує запис цього значення у масив Array. Індексом для запису виступає номер поточної ітерації, що змінюється в межах від 0 до 17, а елементом — дані, отримані з шини. Таким чином, формується послідовний масив значень, що відображає стан шини у кожному циклі зчитування.

У третьому кадрі другого рівня структури Flat Sequence Structure розміщується блок, який відповідає за розгортання масиву та його перетворення у числове значення. Це дозволяє здійснити подальшу обробку даних у форматі, придатному для аналізу та візуалізації.

У завершальному кадрі другого рівня структури Flat Sequence Structure реалізується запис отриманих даних до пам'яті за допомогою прямого доступу через механізм DMA FIFO. У даному випадку використовується альтернативний спосіб обміну даними, який дозволяє передавати великі обсяги інформації з мінімальними затримками. Блок Build Array формує багатовимірний масив елементів, який передається до блоку FIFO Data Write для запису у буфер.

Отримання та візуалізація даних у Host_Main з DMA FIFO у FPGA_RIO1_Main.

Для зчитування даних з буфера FIFO Data_Read використовується цикл While, у межах якого елементи масиву, сформованого у FPGA_RIO1_Main, передаються до блоку IndexArray. У цьому блоці здійснюється вибірка необхідного елемента масиву, після чого дані виводяться на екран, обробляються та розгортаються за допомогою блоку Build Array, що також реалізований у FPGA_RIO1_Main.

У результаті виконання програми ми отримуємо набір експериментальних даних, що включає значення струму для кожної з двох груп обмоток, а також поточне значення кута положення ротора. На основі цих даних будуються графіки зміни кута обертання, що дозволяє візуалізувати динаміку процесу. Значення струму виводяться на екран за допомогою окремих функціональних блоків, що забезпечують зручне представлення інформації для оператора.

Підпрограма Comp_Main.vi відповідає за завантаження експериментальних даних із контролера, їх обробку та подальший запис у файл. Це дозволяє зберігати результати вимірювань для подальшого аналізу та документування.

У процесі виконання підпрограми Host_Main.vi дані, що надходять через механізм DMA FIFO, записуються у глобальну змінну Variable, яка була попередньо створена в межах проєкту. Запис у файл реалізується за допомогою структури Flat Sequence Structure, що складається з трьох послідовних кадрів.

У першому кадрі використовується параметр Offset Past Replacement, який визначає зміщення символу в рядку результату після останнього збігу та заміни. Це значення передається до блоку String Subset, де параметр length задає довжину підрядка, що витягується, починаючи з першого символу (тобто з позиції 0). Далі, за допомогою функції Concatenate, виконується операція об'єднання рядків, що дозволяє сформувати повний текстовий запис для збереження у файл.

Функціональний блок `Get Date/Time String`, розташований у нижній лівій частині схеми, використовується для формування двох параметрів — дати та часу — на основі поточних системних значень. Ці параметри генеруються у стислому форматі, що дозволяє зручно інтегрувати їх у структуру імені файлу та шляху до нього.

Зокрема, значення дати використовується для остаточного формування шляху до папки, в якій буде збережено текстовий файл з розширенням `.txt`. Значення часу, у свою чергу, застосовується як ім'я самого файлу. Для забезпечення сумісності з файловою системою операційної системи, у процесі формування імені файлу використовується блок `Search and Replace String`, який замінює символ «:`**`» на «`-`». Це необхідно через обмеження ОС, яка не дозволяє використовувати певні символи у назвах файлів.

Фінальна строка, що містить повний шлях до файлу, формується за допомогою операції конкатенації рядків. У цьому процесі беруть участь: назва раніше створеної папки, розділовий символ (наприклад, «`\`» або «`/`» залежно від ОС) та сформоване ім'я файлу.

У другому кадрі структури `Flat Sequence Structure` шлях до файлу перетворюється у формат, придатний для файлових операцій, за допомогою функції `String to Path`. Після цього здійснюється створення нового або відкриття вже існуючого файлу з розширенням `.txt`, у який записуються змінні у вигляді числових масивів. Ці масиви мають значення у байтах, а також визначається режим встановлення поточної позиції запису у файлі.

У третьому кадрі тієї ж структури здійснюється запис змінної `Variable`. Для цього її числове значення спочатку перетворюється у текстовий формат за допомогою функції `Number to Decimal String`, після чого запис здійснюється через функцію `Write to Text File`. По завершенні операції запису викликається функція `Close File`, яка закриває файл і завершує процес збереження даних.

Окремо варто зазначити, що розв'язання системи диференціальних рівнянь, яка описує математичну модель двигуна подвійного живлення, реалізовано у віртуальному інструменті `MathModel.vi`. У випадку постійних

параметрів напруги ця модель дозволяє обчислювати значення струму та відповідні диференціальні рівняння. Два з них використовуються для розрахунку потокозчеплення в обмотках, а третє — для визначення електромагнітного моменту, що виникає в системі,

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\psi_{1x}}{dt} &= -\alpha_1 \left[1 - \frac{\alpha_2^2 k_1 k_2}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_\delta)^2} \right] \psi_{1x} + \left[\omega_1 + \frac{\alpha_1 \alpha_2 k_1 k_2 (\omega_1 - \omega_\delta)}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_\delta)^2} \right] \psi_{1y} + \\ &\quad + \frac{\alpha_1 \alpha_2 k_2}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_\delta)^2} U_{2x0} + \frac{\alpha_1 k_2 (\omega_1 - \omega_\delta)}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_\delta)^2} U_{2y0} + u_{1x}; \\ \frac{d\psi_{1y}}{dt} &= - \left[\omega_1 + \frac{\alpha_1 \alpha_2 k_1 k_2 (\omega_1 - \omega_\delta)}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_\delta)^2} \right] \psi_{1x} - \alpha_1 \left[1 - \frac{\alpha_2^2 k_1 k_2}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_\delta)^2} \right] \psi_{1y} - \\ &\quad - \frac{\alpha_1 k_2 (\omega_1 - \omega_\delta)}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_\delta)^2} U_{2x0} + \frac{\alpha_1 \alpha_2 k_2}{\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_\delta)^2} U_{2y0} + u_{1y}; \\ M &= \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2 [\alpha_2^2 + (\omega_1 - \omega_\delta)^2]} \left\{ [(\omega_1 - \omega_\delta) U_{2x0} - \alpha_2 U_{2y0}] \psi_{1x} + \right. \\ &\quad \left. [(\omega_1 - \omega_\delta) U_{2y0} + \alpha_2 U_{2x0}] \psi_{1y} + \alpha_2 k_1 (\omega_1 - \omega_\delta) (\psi_{1x}^2 + \psi_{1y}^2) \right\} \end{aligned} \right. \quad (3.1)$$

Коефіцієнти $a_1, a_2, b, k_1, k_2, a_{-1}, a_{-2}, b, k_{-1}, k_{-2}$ є розрахунковими величинами, які визначаються на основі математичної моделі електромеханічної системи. Параметри напруги та індуктивності, що використовуються у розрахунках, вважаються відомими заздалегідь, оскільки вони відповідають паспортним характеристикам конкретного електродвигуна, що досліджується.

З метою уникнення повторного обчислення зазначених коефіцієнтів при кожному циклі виконання програми, доцільно представити математичну модель у вигляді послідовної структури Flat Sequence Structure. Ця структура є базовим елементом середовища програмування LabVIEW ISP і доступна у палеті інструментів Programming → Structures.

Особливістю Flat Sequence Structure є її послідовне виконання: кожен кадр (frame) виконується строго зліва направо. Передача даних між кадрами здійснюється лише після повного завершення обчислень у попередньому кадрі. Такий підхід забезпечує чітку логічну залежність між етапами обробки —

параметри, що формуються в одному кадрі, безпосередньо впливають на результати наступного. Це дозволяє досягти високої точності та узгодженості при моделюванні фізичних процесів, зокрема при розрахунку електромагнітних величин у системі.

З метою уникнення повторного обчислення коефіцієнтів, які використовуються у математичній моделі електромеханічної системи, доцільно реалізувати цю модель у вигляді послідовної програмної структури Flat Sequence Structure. Такий підхід дозволяє оптимізувати обчислювальний процес, зменшити навантаження на систему та забезпечити логічну узгодженість між етапами моделювання.

Структура Flat Sequence Structure є базовим елементом середовища програмування ICP LabVIEW і розташована у палеті інструментів Programming → Structures. Її принцип роботи полягає у послідовному виконанні кадрів зліва направо. Це означає, що кожен наступний кадр починає виконання лише після повного завершення попереднього. Така логіка забезпечує чітку залежність між параметрами, які формуються на різних етапах, і дозволяє уникнути помилок, пов'язаних із паралельною обробкою несинхронізованих даних.

Програмна реалізація математичної моделі базується на класичному чисельному методі — методі Рунге-Кутти, який широко використовується для розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь. Цей метод дозволяє з високою точністю моделювати динаміку фізичних процесів, що відбуваються в електроприводі. Вихід із циклу обчислень здійснюється після досягнення заздалегідь встановленої кількості ітерацій, що забезпечує контрольовану тривалість моделювання та стабільність результатів.

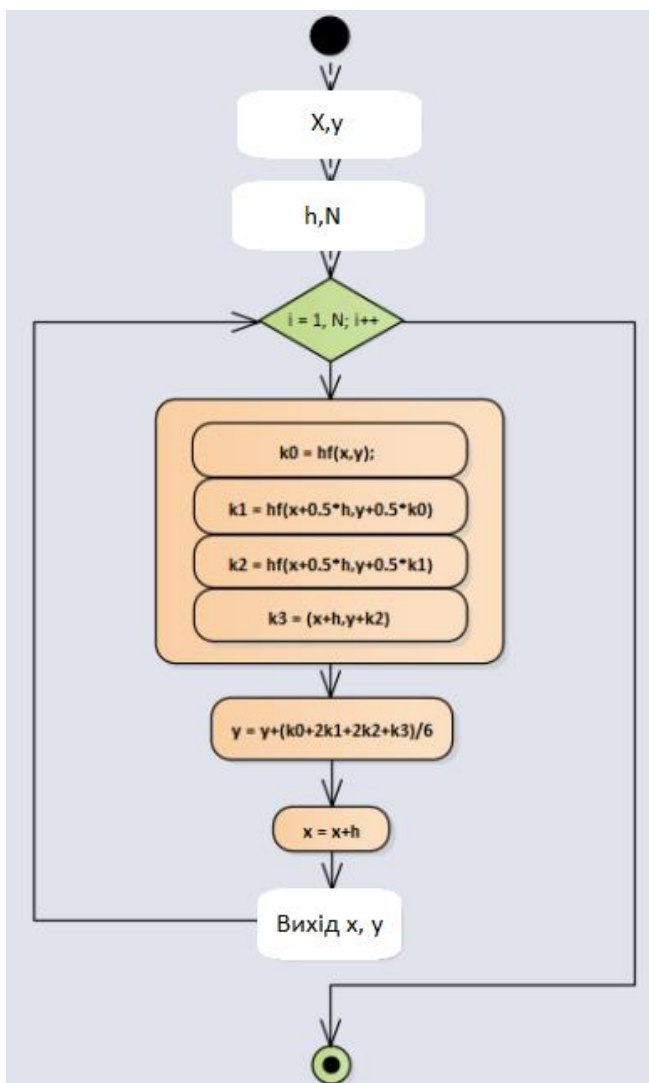


Рисунок 3.6 - Блок-схема алгоритму розрахунку

Для реалізації обчислень у режимі реального часу пропонується застосування спеціалізованої методики, яка забезпечує високу швидкість обробки даних та інтеграцію з програмним середовищем LabVIEW. Основна ідея цієї методики полягає у створенні динамічно підключуваної бібліотеки (Dynamic Link Library) з чітко визначеною конфігурацією, яка розробляється мовою програмування C/C++.

Ця бібліотека виконує роль обчислювального ядра, що дозволяє переносити складні математичні операції за межі графічного середовища LabVIEW, тим самим зменшуючи навантаження на систему та підвищуючи продуктивність. Після створення, бібліотека інтегрується у віртуальний

інструмент, який використовується у проєкті LabVIEW, і викликається у відповідні моменти виконання програми для обробки даних у реальному часі.

Такий підхід дозволяє ефективно поєднувати гнучкість графічного програмування з обчислювальною потужністю мов низького рівня, що особливо актуально для задач, пов'язаних з керуванням електроприводами, обробкою сигналів та реалізацією математичних моделей.

Запропонована методика спрямована на суттєве скорочення часу, необхідного для створення, налагодження та тестування програмного коду, що реалізується у середовищі LabVIEW. Основна перевага цього підходу полягає у використанні вбудованого функціонального вузла Call Library Function Node, який входить до базового набору інструментів інтегрованої системи програмування (ICP) LabVIEW.

Застосування цього вузла дозволяє інтегрувати зовнішні динамічно підключувані бібліотеки (DLL) без потреби встановлення додаткових програмних пакетів, які зазвичай постачаються виробником. Це значно спрощує процес розробки, робить його більш гнучким і доступним, особливо у випадках, коли необхідно реалізувати специфічні обчислювальні функції або оптимізувати роботу системи.

Однією з ключових особливостей DLL-бібліотек є можливість багаторазового використання однієї завантаженої в систему бібліотеки одночасно у кількох програмах. Така властивість позитивно впливає на ефективність використання оперативної пам'яті (ОЗП), що особливо важливо для систем з обмеженими ресурсами або низькою продуктивністю.

Варто також зазначити, що така бібліотека фактично виконує роль плагіна, тобто розширення функціональних можливостей програмного забезпечення LabVIEW. Вона дозволяє реалізовувати додаткові обчислення, обробку даних або специфічні алгоритми, які не входять до стандартного набору інструментів, тим самим підвищуючи гнучкість та масштабованість розроблюваної системи.

Для реалізації даної бібліотеки необхідно використовувати текстову інтегровану систему розробки (ICP). У цьому прикладі як середовище

програмування застосовується Microsoft Visual Studio, що дозволяє створювати високопродуктивні обчислювальні модулі з гнучкою конфігурацією.

Програмний код, який реалізує обчислення для системи диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутти четвертого порядку точності, має певні відмінності від класичних програм, написаних мовами C/C++. Зокрема, ці відмінності стосуються використання специфічних ключових слів, а також особливостей компіляції та збірки додатка у форматі динамічно підключуваної бібліотеки (DLL).

У результаті формується прототип функції, яка передається для розрахунку потокозчеплення — одного з ключових параметрів електромагнітної моделі. Приклад оголошення функції виглядає наступним чином:

```
double __declspec(dllexport)
psiY(double alpha1, double alpha2, double k1, double k2, double omega1,
double omegadw, double U2x0, double U2y0, double u1y, double psilx, double
psily)
```

Ця функція призначена для обчислення потокозчеплення у системі з подвійним живленням, враховуючи параметри напруги, частоти, індуктивності та кутові швидкості. Її реалізація у вигляді DLL дозволяє інтегрувати обчислення у середовище LabVIEW через вузол Call Library Function Node, що забезпечує швидкий доступ до результатів моделювання без необхідності повторного компілювання основного коду.

Для коректного створення динамічно підключуваної бібліотеки (DLL) необхідно попередньо задати спеціальні параметри конфігурації у властивостях проекту. Зокрема, слід вказати додаткові каталоги, які містять заголовочні файли та бібліотеки, необхідні для компіляції. У нашому випадку одним із ключових елементів є файл labview.lib, який забезпечує зв'язок створюваного програмного коду з ядром середовища LabVIEW.

Цей бібліотечний файл потрібно явно додати до конфігурації проекту, щоб забезпечити правильну інтеграцію з LabVIEW та можливість виклику функцій DLL через вузол Call Library Function Node. Крім того, у програмний код слід

включити заголовочний файл <windows.h>, який містить великий набір функцій, специфічних для операційної системи Windows. Ці функції можуть бути використані для розширення функціональності програми, зокрема для роботи з пам'яттю, потоками, файлами тощо.

Також необхідно додати заголовочний файл <extcode.h>, який є частиною середовища LabVIEW і використовується для взаємодії з зовнішнім кодом, імпортованим у LabVIEW. Цей файл дозволяє правильно обробляти типи даних, передавати параметри та забезпечувати стабільну роботу DLL у межах графічного середовища.

Після виконання всіх перелічених налаштувань можна переходити до етапу компіляції проекту. Успішно зібрана бібліотека DLL буде готова до використання у середовищі LabVIEW як плагін, що розширює його функціональні можливості та дозволяє реалізовувати складні обчислювальні алгоритми з високою продуктивністю.

У випадках, коли динамічно підключається бібліотека (DLL) використовується спільно з контролером реального часу, виникає потреба у забезпеченні коректної взаємодії між двома системами — тією, на якій здійснюється розробка бібліотеки, та самою системою реального часу, що виконує обчислення.

З метою спрощення цього процесу виробником програмного забезпечення LabVIEW була розроблена спеціалізована утиліта під назвою LabVIEW RT DLL Checker. Цей інструмент виконує перевірку сумісності окремих елементів DLL-бібліотеки з конкретною версією середовища LabVIEW, що використовується на контролері реального часу.

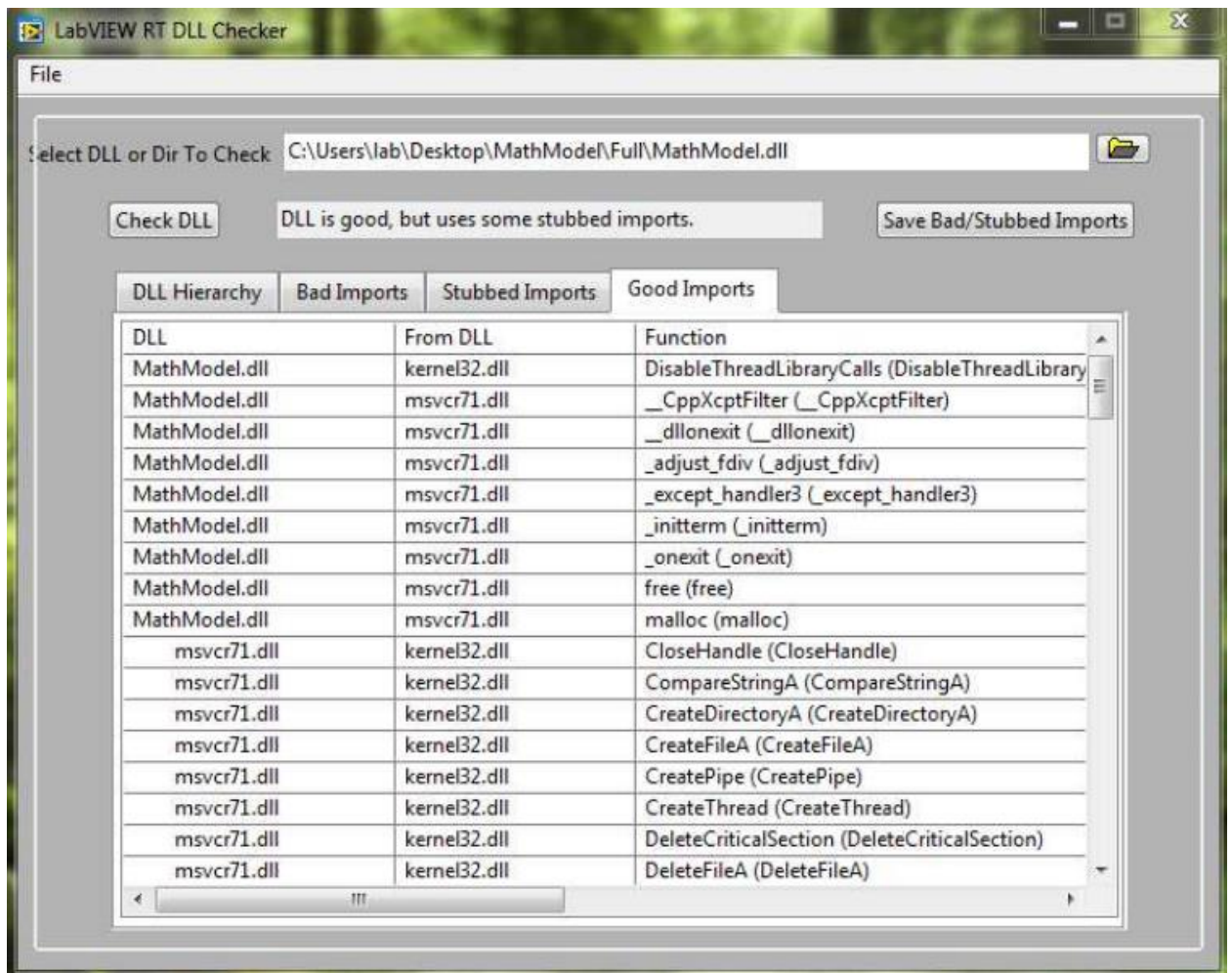


Рисунок 3.7 - Перевірка сумісності DLL

Після успішного проходження етапу перевірки сумісності DLL-бібліотеки з середовищем LabVIEW, можна переходити до налаштування та практичного використання функціонального вузла Call Library Function Node. Цей вузол дозволяє інтегрувати зовнішній програмний код, написаний мовами низького рівня (наприклад, C або C++), безпосередньо у графічне середовище LabVIEW.

Під час відкриття налаштувань вузла користувач має змогу вказати шлях до бібліотеки або її ім'я у полі Function. Це дозволяє LabVIEW ідентифікувати DLL-файл, який буде використовуватись для виклику зовнішніх функцій.

Крім того, при передачі зовнішнього коду необхідно обрати відповідне соглашение о вызовах (calling convention), яке визначає спосіб передачі параметрів у функцію. Найпоширеніми варіантами є Cdecl та Stdcall (WINAPI). Конвенція Cdecl є стандартною для компіляторів мови програмування C і

дозволяє гнучко працювати з параметрами. Натомість Stdcall або WINAPI — це конвенція, яка використовується в операційній системі Windows для виклику функцій API, і вона забезпечує фіксований порядок передачі параметрів.

У блоці Parameters задаються змінні, які передаються у функцію DLL. Для кожної змінної необхідно вказати її назву, тип (наприклад, ціле число, число з плаваючою комою тощо), формат даних, що використовується, а також режим вказівника (тобто, чи передається значення напряму, чи через посилання).

Такий підхід дозволяє точно налаштувати взаємодію між LabVIEW та зовнішньою бібліотекою, забезпечуючи стабільну роботу системи та коректну передачу даних між середовищами.

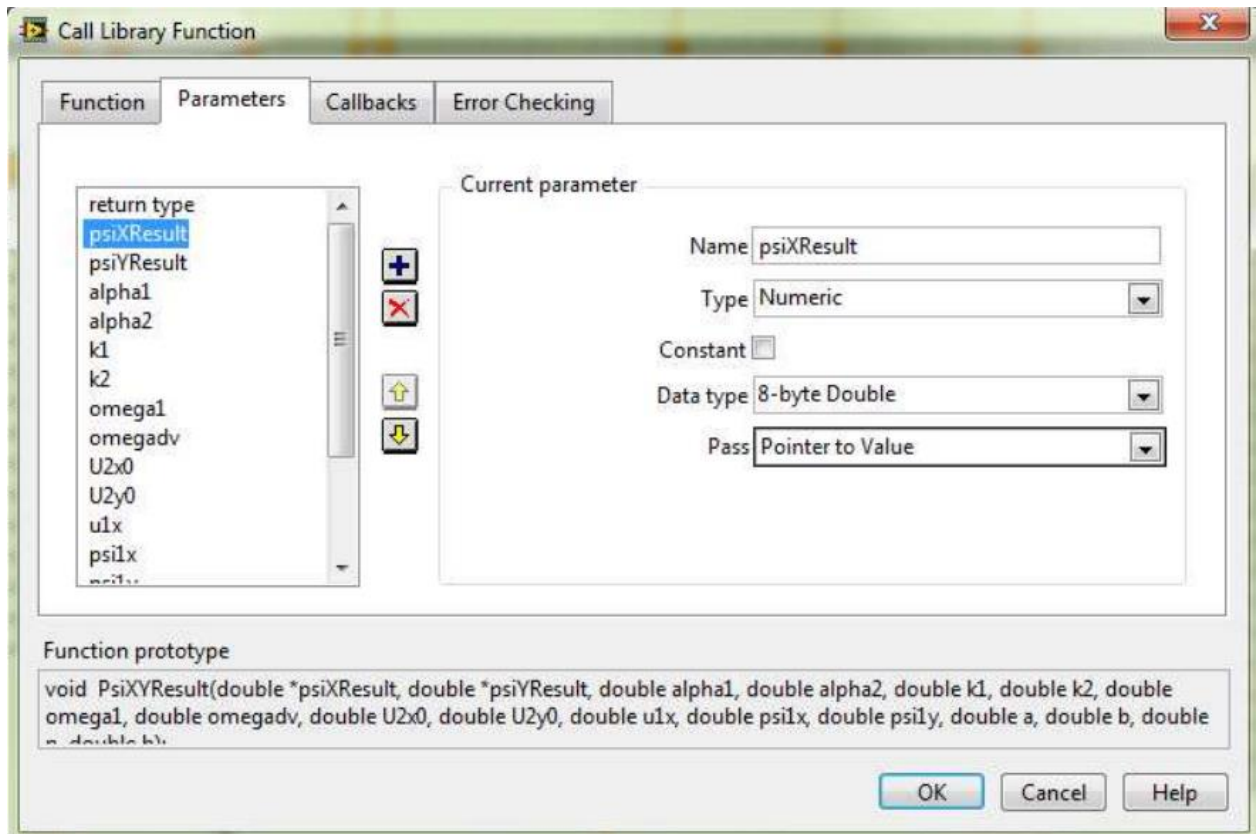


Рисунок 3.8 - Параметри, що передаються у функцію

Одним із ключових аспектів при роботі з функціями, що реалізовані у вигляді зовнішніх бібліотек, є суворе дотримання порядку передачі змінних, відповідно до того, як вони визначені у програмному коді. Це особливо важливо для забезпечення коректної роботи математичних моделей, оскільки

неправильна послідовність параметрів може призвести до помилок у розрахунках або некоректного виконання алгоритму.

Віртуальний інструмент, у якому реалізовано математичну модель, представлений у вигляді послідовної структури (Flat Sequence Structure), що дозволяє чітко розмежувати етапи обчислень. Такий підхід забезпечує логічну узгодженість між кадрами та дозволяє контролювати хід виконання програми.

У першому кадрі цієї структури здійснюється обчислення початкових параметрів, а також розрахунок заданих коефіцієнтів, які є основою для подальших математичних операцій. У другому кадрі виконується розрахунок поточозчеплень — електромагнітних величин, що характеризують взаємодію між обмотками, — а також визначення електромагнітного моменту, який є результатом дії струмів і магнітного поля в системі.

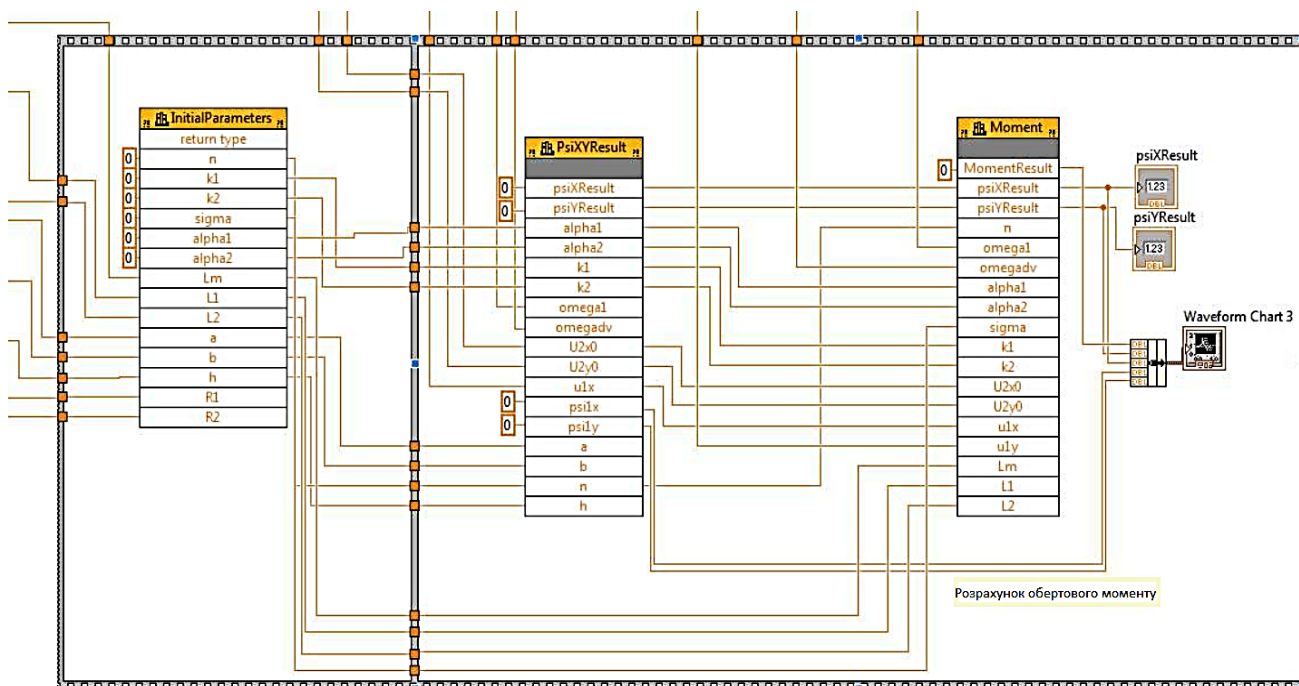


Рисунок 3.9 - Віртуальний прилад з математичною моделлю

Отримані в результаті обчислень значення можуть бути представлені як у вигляді графіків, так і у форматі окремих змінних, що дозволяє зручно аналізувати динаміку процесу. Крім того, передбачена можливість подальшої передачі цих даних за допомогою механізму DMA FIFO, що забезпечує швидкий і ефективний обмін інформацією між модулями системи.

У процесі тестування програмного алгоритму було проведено вимірювання часу, необхідного для розв'язання системи диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутти четвертого порядку точності. За результатами експерименту встановлено, що виконання 100 ітерацій цього алгоритму займає приблизно 10 мілісекунд, що свідчить про високу швидкість обчислень і придатність методу для задач реального часу.

Розраховані значення обертового моменту можуть бути використані як вхідні параметри для подальших обчислень, зокрема для визначення кутової швидкості та кута повороту ротора електродвигуна. Це відкриває перспективу відмови від використання фізичного датчика кутового положення, оскільки необхідні параметри можуть бути отримані шляхом математичного моделювання, що зменшує складність апаратної частини системи та підвищує її надійність.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи методика створення була розроблена автоматизованої системи керування електроприводу, яка може функціонувати на основі математичного моделювання в режимі реального часу. Такий підхід дозволяє забезпечити високий рівень точності, адаптивності та швидкодії при управлінні електромеханічними процесами.

Для реалізації поставлених завдань було проведено глибокий аналіз теоретичних матеріалів, що стосуються принципів побудови систем керування електроприводами, зокрема з використанням двигунів подвійного живлення. Окрему увагу приділено вивченню можливостей програмно-апаратного комплексу, побудованого на базі рішень компанії National Instruments, яка є одним із провідних розробників засобів для інженерного моделювання та автоматизації.

У середовищі LabVIEW, що є графічною інтегрованою платформою для розробки систем керування, було реалізовано проєкт керування індукційним двигуном подвійного живлення. Структура проєкту включає набір віртуальних приладів (Virtual Instruments), кожен з яких виконує певну функцію і фізично прив'язаний до конкретного рівня апаратної реалізації — від контролера до інтерфейсних модулів.

Для математичного опису динаміки двигуна подвійного живлення використано систему диференціальних рівнянь, яка реалізована за допомогою методу Рунге-Кутти четвертого порядку точності. Цей чисельний алгоритм інтегрується у програмне середовище у вигляді динамічно підключуваної бібліотеки (DLL), що дозволяє виконувати обчислення безпосередньо на контролері, який працює під керуванням операційної системи реального часу (RTOS).

Застосування такого підходу забезпечує високу швидкість обробки даних, точне моделювання електромеханічних процесів та гнучкість у налаштуванні

системи керування, що робить розроблену систему перспективною для використання в сучасних мехатронних комплексах.

Розроблений алгоритм реалізації математичної моделі в режимі реального часу, який передбачає виконання низки послідовних етапів, кожен з яких має важливе значення для забезпечення стабільної та коректної роботи системи керування електроприводом.

- 1) Створення динамічно підключуваної бібліотеки (DLL) з урахуванням специфічних параметрів конфігурації, які задаються у текстовому файлі ICP. На цьому етапі формується структура бібліотеки, що містить реалізовані функції математичної моделі, адаптовані для подальшого використання у середовищі реального часу.
- 2) Перевірка сумісності створеної DLL-бібліотеки з операційною системою реального часу, яка встановлена на обраному контролері. Для цього використовується спеціалізована утиліта LabVIEW RT DLL Checker, що дозволяє виявити можливі несумісності між елементами бібліотеки та середовищем виконання, а також забезпечити коректну інтеграцію зовнішнього коду.
- 3) Передача функцій з імпортованої DLL-бібліотеки до вузла Call Library Function Node у середовищі LabVIEW. На цьому етапі здійснюється налаштування параметрів виклику, включаючи вибір відповідного соглашения о вызовах (наприклад, Cdecl або Stdcall), що визначає спосіб передачі аргументів у функцію.
- 4) Передача змінних у функцію, що включає в себе визначення імен змінних, їх типів, форматів даних, які використовуються, а також режимів передачі — напряму або через вказівники. Це дозволяє забезпечити точну відповідність між структурою функції та даними, що передаються.
- 5) Встановлення зв'язків між елементами вузла Call Library Function Node, що забезпечує узгоджену роботу всієї системи. На цьому етапі формується логічна структура взаємодії між функціональними блоками, що дозволяє

реалізувати обчислення математичної моделі у режимі реального часу з високою точністю та стабільністю.

Саме за описаним алгоритмом, у випадку реалізації одноканального керування, було здійснено математичне моделювання індукційного двигуна подвійного живлення. Модель представлена у вигляді трьох диференціальних рівнянь, які описують динаміку електромеханічних процесів у системі приводу.

На основі отриманих експериментальних даних встановлено, що час, необхідний для обчислення системи диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутти четвертого порядку точності, становить приблизно 10 мілісекунд на 100 ітерацій алгоритму. Такий показник є цілком прийнятним і достатнім для використання моделі в умовах реального часу, особливо при розрахунку механічних характеристик електродвигуна, таких як момент, швидкість та положення.

Розраховані значення електромагнітного моменту можуть бути використані як основа для подальших обчислень, зокрема для визначення кутової швидкості обертання та кута повороту ротора. Це відкриває можливість відмови від використання фізичного датчика кутового положення, оскільки всі необхідні параметри можуть бути отримані шляхом математичного моделювання, що значно спрощує апаратну частину системи та знижує її вартість.

Таким чином, результати проведеного дослідження підтверджують доцільність застосування математичної моделі у системах керування електроприводами, особливо при використанні мікропроцесорних засобів обробки інформації, які здатні забезпечити високу точність і швидкодію.

На основі узагальнення отриманих результатів була запропонована методика використання математичної моделі двигуна подвійного живлення для виконання обчислень у режимі реального часу, що дозволяє інтегрувати її у сучасні мехатронні системи керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A fault tolerant motor drive for electric power steering systems. A. Al-Dweik (Newcastle University) 2019. - <http://theses.ncl.ac.uk/jspui/handle/10443/4792>
2. Brushless Doubly-Fed Reluctance Machine Modeling, Design and Optimization, Tiago Staudt 2015. - <https://theses.hal.science/tel-01218132>
3. Using LabVIEW FPGA for Physics Instrumentation and Control , Gary Boorman2024.https://indico.cern.ch/event/1388470/contributions/5911542/attachments/2844999/4974106/CernUG_20240424.pdf
4. Runge-Kutta Method, <https://www.mathros.net.ua/en/runge-kutta-method.html>
5. Farhan A.S., Ayman A.Aly.El. Fundamentals of Automatic Control: Theory and Application. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 616 p.
6. Bavafa-Toosi Y. Introduction to Linear Control Systems – Academic Press, 2017. – 929 p. – ISBN 978-0-12-812748-3.
7. Д.В. Щербінін, Н.В. Єрмілова. Енергозберігаюче управління індукторним динамічним електроприводом подвійного живлення / Щербінін Д.В., Єрмілова Н.В. // Збірник наукових праць за матеріалами XI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». (Полтава, 18 грудня 2025 р.) – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2025.
8. Шефер О.В., Єрмілова Н.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності G3 «Електрична інженерія» (141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка») – Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. – 26 с.
9. Моделювання систем: Підручник для вузів / В.М. Томашевський. – К.: ВНУ, 2005. – 352 с.
10. Основи комп'ютерного моделювання: навч. посібник / М.С. Барабаш, П.М. Кір'язев, О.І. Лапенко, М.А. Ромашкіна. 2-е вид. стер. – К.: НАУ, 2019. – 492 с.

11. Голодний І.М., Червінський Л.С., Жильцов А.В., Санченко О.В. Романенко О.І. Моделювання регульованого електропривода: Підручник. – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.: іл.
12. Цвіркун Л.І. Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. / Л.І. Цвіркун, Г. Грулер ; під заг. ред. Л.І. Цвіркуна ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 3-тє вид., переробл. і доповн. – Дніпро: НГУ, 2017. – 224 с.
13. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. –Д., Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.
14. Донець О. В. Теорія електропривода/ В. І. Колотіло, О. В. Донець; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 148 с.
15. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посібник для вищ. навч. закл., за ред. Поповича М.Г., Лозинського О.Ю. – К.:Либідь, 2005. – 678 с.
16. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.
17. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За ред. М.Г. Поповича. – К.: Либідь, 2005. – 672 с.
18. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. Підручник. – К: Либідь, 2007, – 656с.
19. Шефер О.В. Електропривод та автоматизація загальнопромислових механізмів: конспект лекцій. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – 154 с.
20. Шефер, В.В. Електричні машини: навчальний посібник / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава, ПолтНТУ, 2015. – 536 с.
- 21.Єрмілова Н.В., Кислиця С.Г. Навчальний посібник до самостійного вивчення курсу "Основи метрології і електричних вимірювань" для студентів спеціальності 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” денної та заочної форм навчання. – Полтава: ПолтНТУ, 2017. – 141 с.

22. Павленко Т.П. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів. Конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / Т.П. Павленко, О.В. Донець, О.М. Петренко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. – 132с.
23. Каталог електродвигунів серії АІР. – Режим доступу: https://air.com.ua/katalog_elektrodvigateli_air/
24. Brushless Doubly-Fed Reluctance Machine Modeling, Design and Optimization, 2015, <https://hal.science/tel-01218132>

ДОДАТКИ

Міністерство освіти та науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Розроблення алгоритму енергозберігаючого управління індукторним
динамічним електроприводом подвійного живлення**

Додаток А

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

Студент гр. 601МЕ

Щербінін Д.В.

Керівник:

Доцент, к.т.н.

Єрмілова Н.В.

Полтава 2026

1

Актуальність теми у сучасних умовах експлуатації електромеханічних систем спостерігається суттєве зростання вимог до їхніх функціональних характеристик, зокрема до забезпечення високого рівня точності позиціонування, стабільності роботи в різних режимах навантаження, а також до ефективного використання енергетичних ресурсів, що обумовлює необхідність впровадження новітніх технічних рішень у сфері електроприводів.

Метою роботи у межах виконаної роботи здійснюється комплексна розробка, яка включає створення детальної математичної моделі індукторного двигуна подвійного живлення, побудову програмно-апаратного комплексу на основі сучасних інструментів моделювання та вимірювання, а також формування повноцінної системи керування, здатної забезпечувати адаптивне функціонування електропривода в реальному часі. Такий підхід дозволяє не лише теоретично описати процеси, що відбуваються в електромеханічній системі, але й реалізувати їх практичне відтворення за допомогою інтегрованих апаратних і програмних засобів, що значно підвищує точність, стабільність та ефективність роботи приводу.

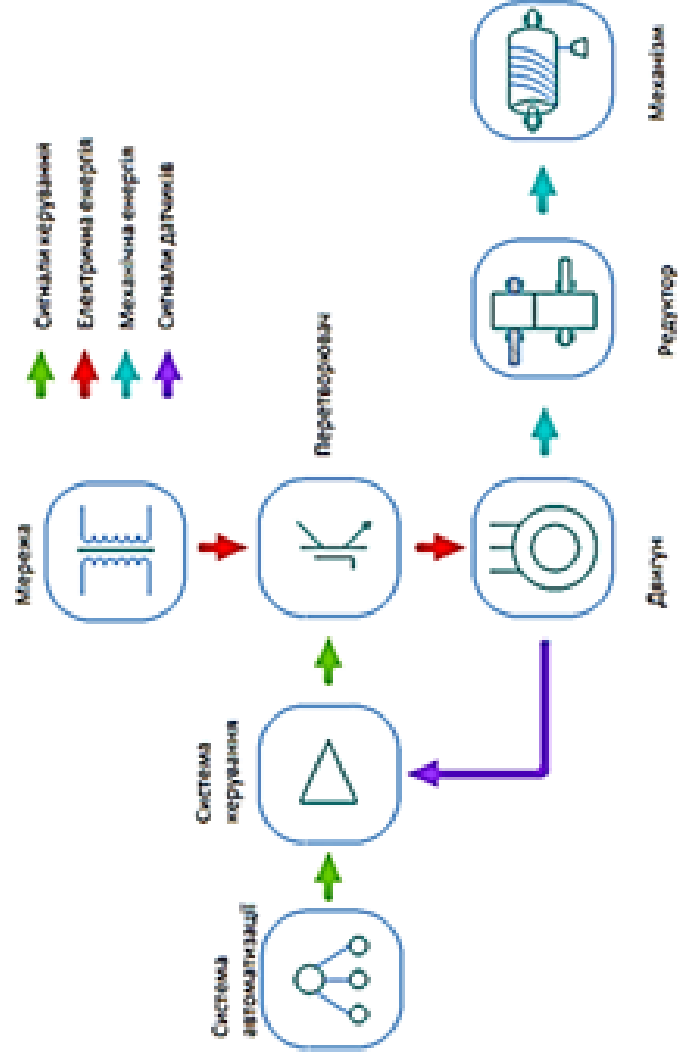
Об'єктом кваліфікаційної роботи магістранта є розроблення електроприводу з індукторним двигуном подвійного живлення, який розглядається як складна електромеханічна система для автоматизованого керування.

Предмет дослідження є індукційний двигун.

АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

- 1) Електроприводи високої точності використовуються в мехатроніці, робототехніці та промислових системах.
- 2) Складність: побудова математичних моделей електромагнітних процесів, робота в реальному часі.
- 3) Переваги ІДПЖ: високий момент, точність, можливість фазозалежного керування.

Структура сучасного електропривода



ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС

Для створення оптимальних вимірювальних систем широко застосовуються інструменти та рішення компанії *National Instruments*. Основним середовищем є *LabVIEW*, яке дозволяє інтегрувати апаратні та програмні засоби в єдину систему.

Програмно-апаратний комплекс забезпечує інтеграцію систем керування, включаючи ПЛС, що дозволяє реалізовувати складні алгоритми в реальному часі.

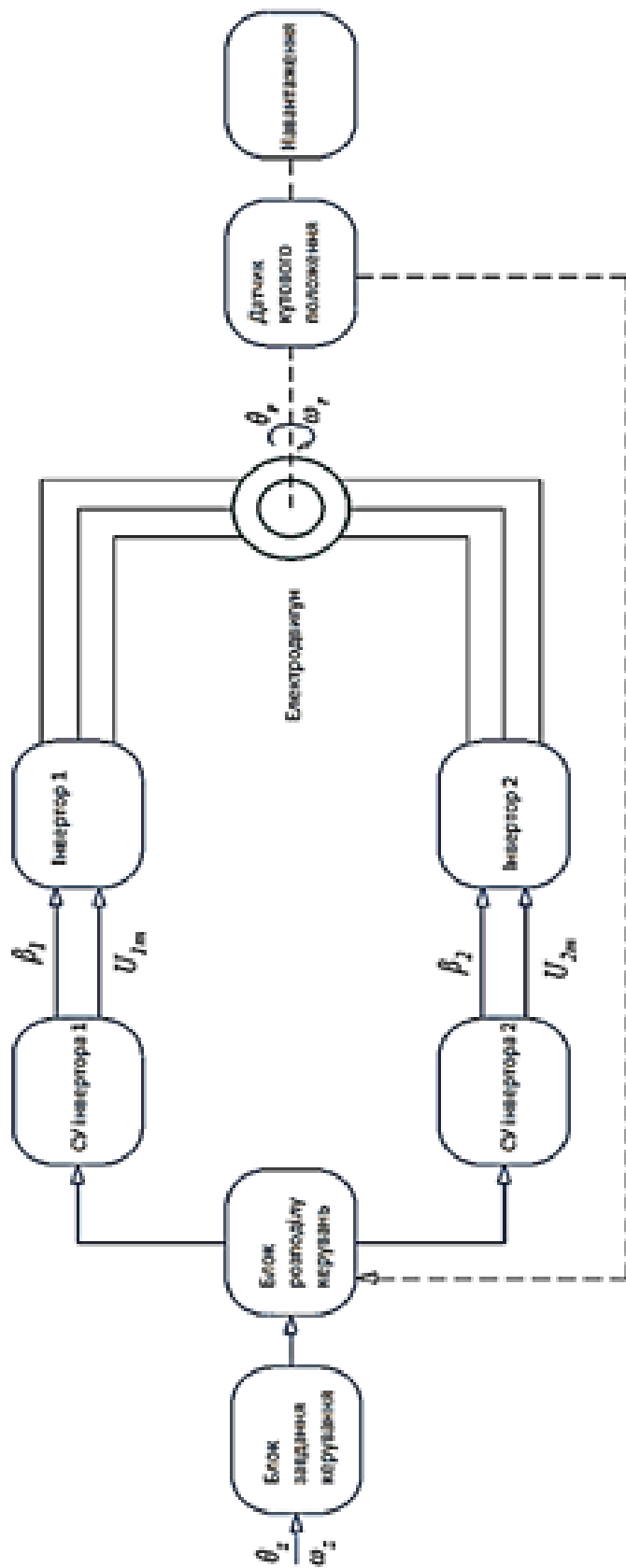
PXI – це високопродуктивна модульна платформа, призначена для створення автоматизованих вимірювальних та випробувальних комплексів.



Розташування модулів у платформі PXI-1042

СТРУКТУРНА СХЕМА ПРИСТРОЮ КЕРУВАННЯ ІДІЖ

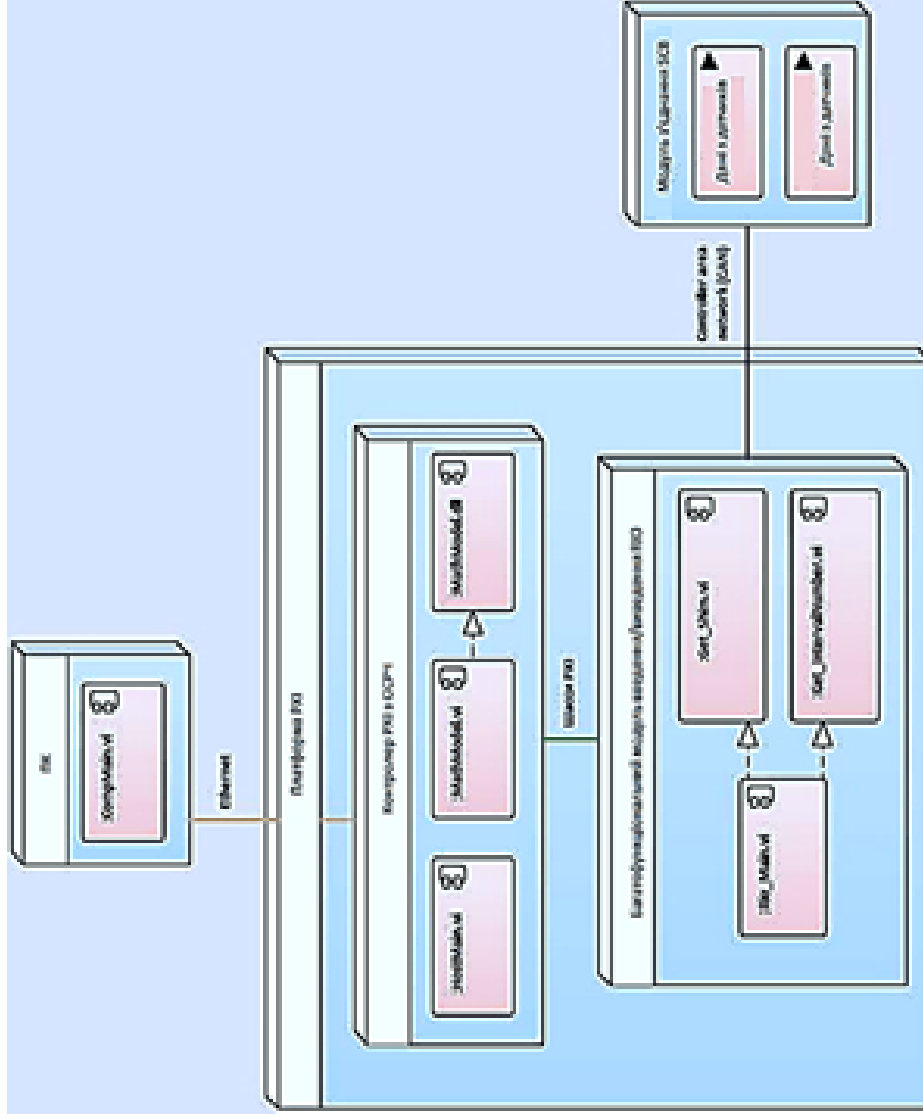
структурна схема індукційного електропривода постійного живлення з фазозалежним керуванням у загальному вигляді



ДІАГРАМА РОЗГОРТАННЯ ПРОЄКТУ

5

Розроблене програмне забезпечення в середовищі LabVIEW складається з проекту, представленого віртуальними інструментами, розміщеними на ПК, контролері PXI з операційною системою реального часу, а також багатофункціональному модулі введення/виведення з ПЛІС. Це забезпечує низьку затримку та високу точність виконання алгоритмів, стабільну роботу в умовах жорстких часових обмежень і можливість паралельного виконання декількох задач без втрати продуктивності.



МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДВИГУНА ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ У ВЛАСНИХ ОСЯХ ОБМОТОК

6

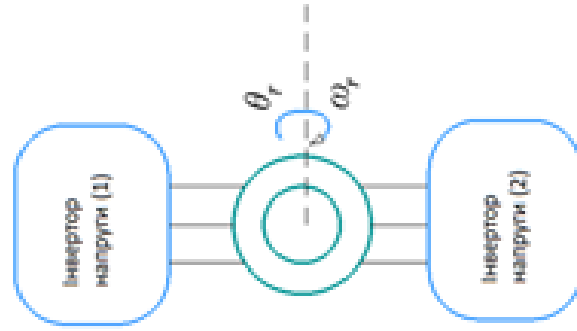
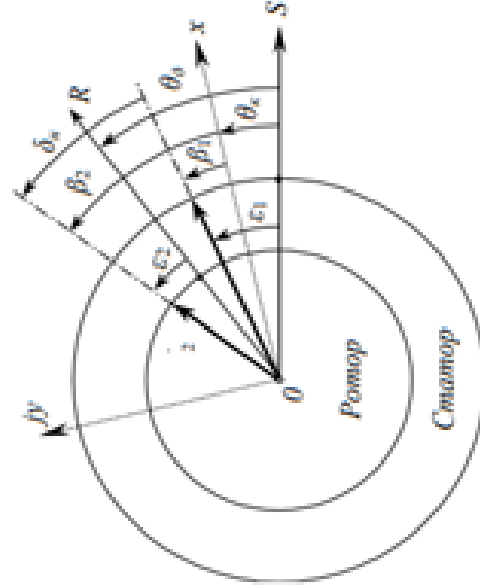
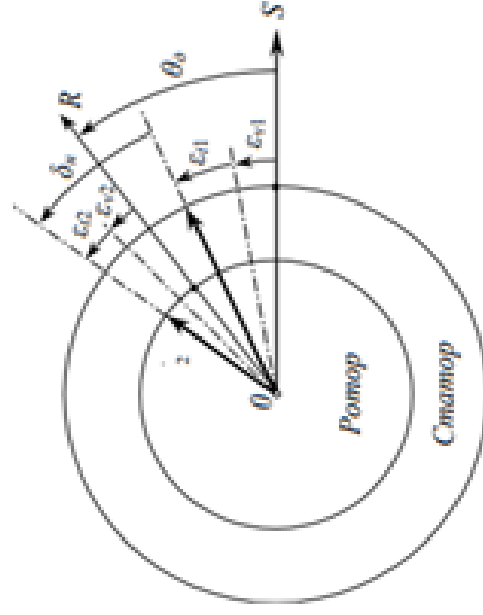


Схема підключення ДПЖ



Обертовий момент двигуна, що виражається як похідна електромагнітної енергії за кутом повороту



Власні координати обмоток

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ



Представлено зовнішній вигляд дослідної системи, яка використовується для реалізації та тестування алгоритмів керування електроприводом

Розроблене програмне забезпечення, створене у середовищі графічного програмування LabVIEW, має модульну структуру та складається з кількох взаємопов'язаних компонентів.

Завдяки використанню середовища LabVIEW, програмне забезпечення має зручний інтерфейс для налаштування, візуалізації та моніторингу параметрів, що значно спрощує процес розробки, налагодження та експлуатації системи керування електроприводом.

Загальний вигляд системи

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було розроблено методику створення автоматизованої системи керування електроприводом на основі математичного моделювання в режимі реального часу.

Реалізація моделі індукційного двигуна подвійного живлення у середовищі LabVIEW та її інтеграція у вигляді DLL-бібліотеки забезпечили високу точність, швидкодію та стабільність обчислень. Побудована модель продемонструвала здатність точно визначати електромагнітний момент, кутову швидкість і кут повороту ротора, що робить можливим відмову від фізичного датчика кутового положення та зменшує апаратні витрати.

Таким чином, результати проведеного дослідження підтверджують доцільність застосування математичної моделі у системах керування електроприводами, особливо при використанні мікропроцесорних засобів обробки інформації, які здатні забезпечити високу точність і швидкодію.

На основі узагальнення отриманих результатів була запропонована методика використання математичної моделі двигуна подвійного живлення для виконання обчислень у режимі реального часу, що дозволяє інтегрувати її у сучасні мехатронні системи керування.

Можливе практичне використання розробленої системи: промислові приводи для насосів, компресорів, де потрібне точне керування моментом. Електроприводи в робототехніці, де важлива компактність, швидкодія та адаптивне керування без перевантаження апаратної частини.

Додаток Б

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
за матеріалами XI Всеукраїнської науково-практичної конференції
**«ЕЛЕКТРОННІ ТА МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ:
ТЕОРІЯ, ІННОВАЦІЇ, ПРАКТИКА»**
18 грудня 2025 року



Полтава 2025

УДК 681.58

Д.В. Щербінін, магістрант

Н.В. Єрмілова, к.т.н., доцент

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧЕ УПРАВЛІННЯ ІНДУКТОРНИМ ДИНАМІЧНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ

В роботі розглянуто електропривод, що працює на базі індукторного двигуна подвійного живлення (ІДПЖ) як перспективний напрям, що поєднує принципи електромагнітного редукування та подвійного живлення [1]. У зв'язку зі зростанням вимог до сучасних електроприводів у промисловості, транспорті та автоматизованих системах, дана робота має чітко визначену актуальність [2].

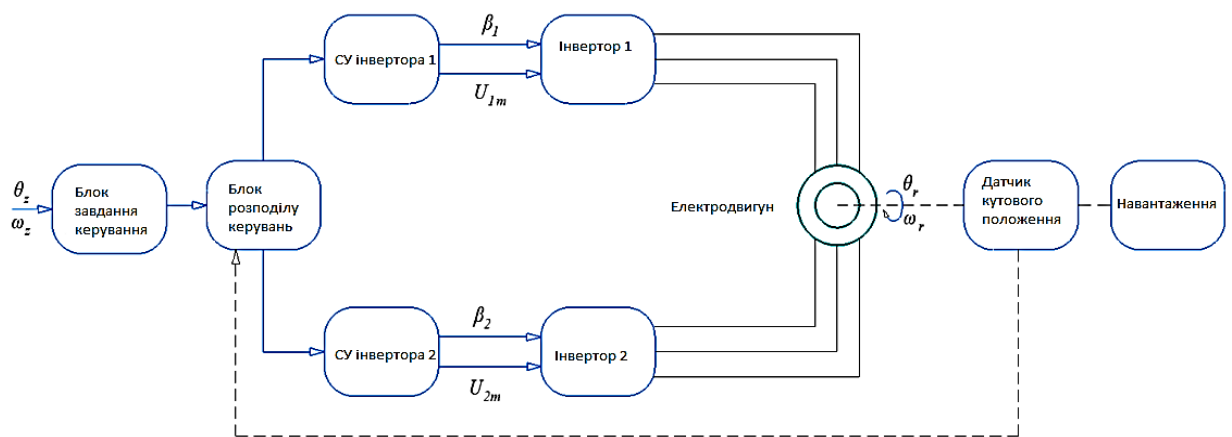


Рис. 1 – Структурна схема індукційного електропривода подвійного живлення з фазозалежним керуванням (ФЗК)

Електропривод з ІДПЖ при ФЗК в загальному вигляді включає в себе двигун з першою та другою статорними обмотками, до яких підключені перший і другий інвертори з відповідними системами керування, що формують на своїх виходах потенціали живлячих напруг (рис.1).

Блок завдання керувань формує закони їх зміни, а сигнали завдання амплітуд, частот і фазових зсувів живлячих напруг формуються залежно від бажаних значень кута повороту та кутової швидкості ротора.

Блок розподілу керувань формує із загальних сигналів завдання окремі сигнали для кожного з двох інверторів. Також до складу системи входять датчик кутового положення ротора та механічне навантаження на даний привод.

Значну увагу приділено програмно-апаратним засобам (LabVIEW, PXI, FPGA, ОС реального часу), які забезпечують моделювання та керування у режимі реального часу [3]. Під час розробки схем керування та збору даних в роботі для модуля NI PXI-7833R використовується програмний модуль LabVIEW FPGA у середовищі графічного програмування NI LabVIEW.

Програмні модулі, реалізовані на контролері та модулях введення/виведення, забезпечують роботу системи в режимі реального часу та

дозволяють формувати синусоїдальні струми в двох трифазних обмотках ІДПЖ за допомогою широтно-імпульсної модуляції.

Розроблене програмне забезпечення в середовищі LabVIEW складається з проєкту, представленого віртуальними інструментами, розміщеними на ПК, контролері PXI з операційною системою реального часу, а також багатофункціональному модулі введення/виведення з програмованої логічної інтегральної схеми (ПЛІС).

Проведена розробка інтелектуальної системи керування, яка здатна адаптуватися до змін навантаження та забезпечувати високу точність позиціонування. Робота відповідає сучасним тенденціям розвитку мехатронних систем та енергоефективних електроприводів, у ній показане глибоке розуміння предметної області, проведена систематизація класифікації електроприводів та визначені ключові вимоги до прецизійних систем. Практична частина роботи базується на сучасних інструментах (LabVIEW, PXI, FPGA), що підтверджує її прикладну цінність та можливість інтеграції у реальні промислові комплекси.

Запропонована інтелектуальна система керування забезпечує адаптивність, точність та енергоефективність електроприводу, що робить її перспективною для застосування у робототехніці, медичному обладнанні та автоматизованих виробничих процесах [4].

Робота має як теоретичну, так і практичну значимість, може бути використана як основа для подальших досліджень у сфері прецизійних електроприводів та мехатроніки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *A fault tolerant motor drive for electric power steering systems*. A. Al-Dweik (Newcastle University) 2019. - <http://theses.ncl.ac.uk/jspui/handle/10443/4792>
2. *Brushless Doubly-Fed Reluctance Machine Modeling, Design and Optimization*, Tiago Staudt 2015. - <https://theses.hal.science/tel-01218132>
3. *Using LabVIEW FPGA for Physics Instrumentation and Control*, Gary Boorman 2024. https://indico.cern.ch/event/1388470/contributions/5911542/attachments/2844999/4974106/CernUG_20240424.pdf
4. Цвіркун Л.І. *Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб.* / Л.І. Цвіркун, Г. Грулер ; під заг. ред. Л.І. Цвіркуна ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 3-тє вид., переробл. і доповн. – Дніпро: НГУ, 2017. – 224 с.

ENERGY-SAVING CONTROL OF INDUCTOR DYNAMIC ELECTRIC DRIVE WITH DUAL POWER SUPPLY

D. Shcherbinin, undergraduate,

N. Yermilova, Ph.D., Associate professor

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»