

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

### бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: Розробка автоматизованої системи управління електроприводом

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕТ-42  
спеціальнос  
ті 141

електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Александр Т. А.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Белякова І.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач  
кафедри Коваль В.П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Габрусєв Г.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)



6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Гурик О. Я. к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Мовчан Л.Т., к.т.н., доц		

7. Дата видачі завдання 2 січня 2026 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	20.01.2026	
2	Аналітичний розділ	03.02.2026	
3	Проектно-конструкторський розділ	10.03.2026	
4	Розрахунковий розділ	14.04.2026	
5	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	05.05.2026	
6	Висновки	31.05.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки	26.05.2026	
8	Оформлення графічної частини	10.06.2026	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Александр Т. А.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Белякова І.В.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–42.  
- Т. : ТНТУ, 2026.

Стор.63; рис.26 ; табл.0 ; джерел 13; додатків 2.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Розробка автоматизованої системи управління електроприводом».

Метою кваліфікаційної роботи є розробка системи управління електроприводом з використанням математичної моделі в режимі реального часу.

У першому розділі розглянуто основні характеристики, структуру та принципи функціонування сучасних електроприводів. Проаналізовано класифікацію електроприводів за різними ознаками, а також їх основні статичні, механічні, електромеханічні та динамічні властивості. Розглянуто сучасні підходи до побудови автоматизованих систем керування електроприводами.

У другому розділі розроблено структурну та принципову схеми пристрою, виконано вибір елементної бази та обґрунтовано прийняті проектно-конструкторські рішення. Розглянуто принцип роботи основних вузлів пристрою, їхню взаємодію та особливості реалізації. Також наведено опис конструкції розробленого виробу та його функціональних можливостей.

У третьому розділі виконано необхідні інженерні та технічні розрахунки основних параметрів пристрою. Проведено перевірку працездатності та відповідності отриманих характеристик заданим вимогам. Результати розрахунків підтвердили доцільність використання обраних технічних рішень та ефективність розробленої конструкції.

*Ключові слова:* електропривід, автоматизована система управління, мікроконтролер, регулювання швидкості.

## ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Характеристики та інформація про електроприводи	8
1.2 Інструменти, що використовуються при розробці автоматизованих систем управління	11
1.3 Програмно-апаратний комплекс	14
1.4 Висновки до розділу	18
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	19
2.1 Основні вимоги до системи керування електроприводом.	19
2.2 Структурна схема пристрою управління індукторним двигуном подвійного живлення	22
2.3 Математична модель двигуна подвійного живлення	27
2.3.1 Математична модель двигуна подвійного живлення в єдиній системі обертових координат	30
2.3.2 Спрощена нелінійна модель ДПЖ	33
2.4 Висновки до розділу	35
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	37
3.1 Розробка системи управління електроприводом	37
3.2 Програмне забезпечення установки	37
3.3 Технічні засоби та рішення для створення віртуальних приладів	40
3.4 Модель імітації та результати моделювання	48

3.5 Висновки до розділу	54
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	56
4.1 Підвищення стійкості функціонування організації в надзвичайних ситуаціях	57
4.2 Заходи з електробезпеки	58
4.3 Заходи протипожежної безпеки	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	61
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	62

## ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості характеризується широким впровадженням автоматизованих систем керування технологічними процесами, робототехнічних комплексів, високоточного виробничого обладнання та інтелектуальних електромеханічних систем. Одним із ключових елементів таких систем є електропривод, який забезпечує перетворення електричної енергії у механічну та реалізує керований рух виконавчих механізмів відповідно до вимог технологічного процесу.

Постійне підвищення вимог до точності позиціонування, швидкодії, енергоефективності та надійності сучасного обладнання обумовлює необхідність удосконалення існуючих систем керування електроприводами та впровадження нових технічних рішень. Особливо актуальним є використання цифрових систем керування, програмованих логічних інтегральних схем (FPGA), високошвидкісних мікропроцесорних платформ та сучасних методів математичного моделювання електромеханічних процесів.

Серед перспективних типів електричних машин особливий інтерес становлять індукторні двигуни подвійного живлення. Такі двигуни характеризуються високою надійністю, простотою конструкції, широкими можливостями регулювання електромагнітного моменту та кутової швидкості, а також здатністю працювати в складних режимах навантаження. Завдяки наявності двох незалежних систем живлення статорних обмоток двигуни подвійного живлення дозволяють реалізовувати більш гнучкі алгоритми керування порівняно з традиційними електроприводами.

Разом із тим реалізація ефективних систем керування індукторними двигунами подвійного живлення потребує розробки адекватних математичних моделей, які б враховували особливості електромагнітних процесів у машині та могли використовуватись для роботи в режимі реального часу. Важливим завданням є також створення програмно-апаратних засобів, здатних забезпечувати високоточне

формування сигналів керування, обробку інформації від датчиків та виконання складних алгоритмів керування із мінімальними часовими затримками.

Ефективним рішенням для побудови подібних систем є використання програмно-апаратних комплексів National Instruments на базі платформи PXI та середовища графічного програмування LabVIEW. Поєднання контролерів реального часу, FPGA-модулів та сучасних засобів розробки програмного забезпечення дозволяє реалізувати високопродуктивні системи керування електроприводами, що відповідають сучасним вимогам промислової автоматизації.

Таким чином, розробка системи керування індукторним електроприводом подвійного живлення на основі сучасних програмно-апаратних засобів є актуальним науково-технічним завданням, спрямованим на підвищення ефективності, точності та надійності роботи електромеханічних систем.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка системи управління електроприводом з використанням математичної моделі в режимі реального часу.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

- – дослідити особливості індукторних двигунів подвійного живлення та принципи їх функціонування та виконати аналіз сучасних програмних та апаратних засобів, що використовуються для розробки систем керування електроприводами;
- – розробити структурну схему системи керування індукторним електроприводом подвійного живлення і побудувати математичну модель двигуна подвійного живлення у власній та єдиній системах координат;
- – реалізувати програмне забезпечення системи керування із застосуванням технологій LabVIEW та FPGA та реалізувати математичну модель двигуна у вигляді динамічно підключеної бібліотеки для використання в середовищі LabVIEW;
- – створити імітаційну модель системи керування електроприводом та провести дослідження її роботи в різних режимах;
- – виконати аналіз результатів моделювання та оцінити ефективність розробленої системи керування;

# 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Характеристики та інформація про електроприводи

Електропривід є невід'ємною складовою більшої частини сучасних машин і виробничих установок, що забезпечує виконання механічного руху робочих органів відповідно до вимог технологічного процесу. Його основним завданням є перетворення електричної енергії в механічну енергію та керування процесом її передачі до виконавчих механізмів.

Завдяки електроприводу здійснюється регулювання основних параметрів руху, зокрема кутової або лінійної швидкості, положення, прискорення, уповільнення та обертового моменту. Це дозволяє забезпечити необхідну точність, продуктивність і надійність роботи технологічного обладнання в різних режимах експлуатації. Сучасні системи електропривода також виконують функції автоматичного керування, контролю та захисту, що сприяє підвищенню енергоефективності й якості функціонування виробничих систем. До складу сучасного електропривода входять електродвигун, силовий перетворювач, система керування, механічна передача та виконавчий механізм. Спільна робота цих елементів забезпечує необхідний режим функціонування технологічного обладнання та стабільність електромеханічних процесів.[1]

З розвитком автоматизації виробництва та впровадженням сучасних інформаційних технологій електроприводи набули надзвичайно широкого поширення як у промисловості, так і в побутовій сфері. На сьогодні електроприводи займають провідне місце серед усіх типів приводних систем за кількістю встановлених електродвигунів та сумарною потужністю.

Сучасні електроприводи застосовуються у верстатах із ЧПУ, робототехнічних системах, транспортному обладнанні, конвеєрних лініях, насосних і компресорних установках, вентиляційних системах, ліфтовому обладнанні, побутовій техніці та багатьох інших галузях промисловості й техніки.

Однією з ключових особливостей сучасного етапу розвитку електроприводної техніки є широке використання напівпровідникових силових перетворювачів. Застосування силової електроніки дозволяє ефективно регулювати швидкість, момент та інші параметри електропривода, забезпечуючи при цьому високу енергоефективність системи та зниження втрат електроенергії.

Використання сучасних силових перетворювачів значно покращує динамічні характеристики електроприводів, підвищує плавність регулювання та дозволяє реалізовувати складні режими роботи виконавчих механізмів. [2]

Не менш важливим напрямом розвитку електроприводів є впровадження цифрових та мікропроцесорних систем керування. Використання мікроконтролерів, цифрових сигнальних процесорів та промислових контролерів забезпечує можливість реалізації складних алгоритмів керування, зокрема:

- векторного керування;
- адаптивного керування;
- слідкуючого керування;
- інтелектуального керування;
- позиційного керування.

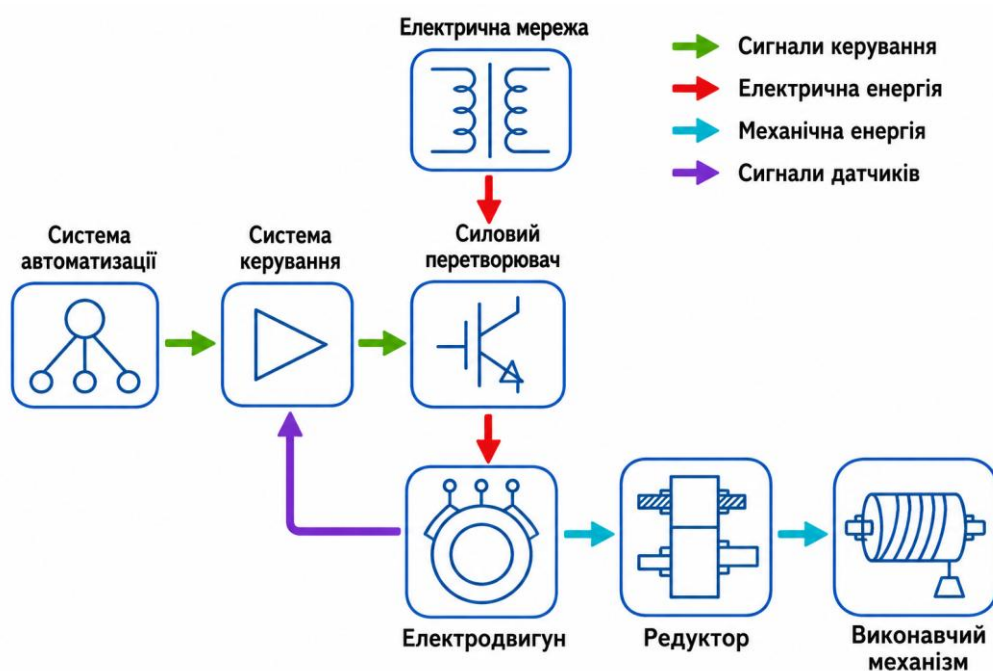


Рисунок 1.1 – Структура сучасного електроприводу

У типовому випадку до складу електропривода входять електродвигун, механічна передача (редуктор), датчики швидкості та положення, а також система керування із замкненим контуром регулювання. Взаємодія цих елементів забезпечує точне керування рухом виконавчого механізму та підтримання заданих параметрів роботи незалежно від зміни навантаження або зовнішніх впливів. [3]

Важливою складовою сучасних електроприводів є система зворотного зв'язку, яка формує інформацію про поточний стан об'єкта керування та передає її до системи регулювання. Завдяки цьому забезпечується висока точність підтримання швидкості, положення або моменту, а також підвищується стійкість і якість перехідних процесів.

На сучасному етапі розвитку електроприводи постійно вдосконалюються відповідно до зростаючих вимог промисловості. Основними напрямками їх розвитку є підвищення енергоефективності, зменшення споживання електричної енергії, покращення динамічних характеристик, зниження масогабаритних показників обладнання та підвищення рівня надійності. Крім того, значна увага приділяється впровадженню цифрових технологій керування, інтелектуальних алгоритмів регулювання та засобів автоматичної діагностики, що дозволяє підвищити ефективність експлуатації електроприводів і зменшити витрати на їх обслуговування. [4]

Основними напрямками розвитку електроприводної техніки є:

- підвищення енергоефективності;
- впровадження цифрових систем керування;
- використання інтелектуальних алгоритмів керування;
- підвищення точності та швидкодії;
- інтеграція в автоматизовані системи управління;
- підвищення надійності та довговічності.

## **1.2 Інструменти, що використовуються при розробці автоматизованих систем управління**

Сучасні системи прецизійних електроприводів характеризуються високими вимогами до точності, швидкодії, надійності, енергоефективності та функціональних можливостей. Крім того, значна увага приділяється зменшенню масогабаритних показників, підвищенню продуктивності та забезпеченню стабільної роботи в режимі реального часу. [5]

Для реалізації сучасних систем автоматичного керування електроприводами необхідним є використання спеціалізованих програмних та апаратних засобів, які забезпечують розробку, налагодження, тестування та впровадження алгоритмів керування. Застосування таких засобів дозволяє підвищити ефективність процесу розробки, скоротити час створення програмного забезпечення та забезпечити високу якість функціонування системи в реальних умовах експлуатації.

Важливе місце у створенні сучасних систем керування займають інтегровані середовища розробки, мікропроцесорні платформи, програмовані логічні інтегральні схеми (FPGA), а також модульні комплекси збору та обробки даних. Використання зазначених засобів дозволяє реалізовувати складні алгоритми керування в режимі реального часу, забезпечувати високу швидкодію системи та здійснювати ефективну взаємодію між апаратною і програмною складовими електропривода.

Стрімкий розвиток інформаційних технологій сприяв появі великої кількості сучасних інтегрованих середовищ розробки програмного забезпечення (IDE — Integrated Development Environment). Такі середовища надають розробникам широкий набір інструментів для написання, налагодження, тестування та супроводу програмного коду. Вони широко застосовуються під час створення програмного забезпечення для систем автоматичного керування, зокрема електроприводів різного призначення. [6]

Сучасні IDE забезпечують підтримку різних мов програмування, засобів моделювання та візуалізації процесів, а також інтеграцію з апаратними

платформами. Це дозволяє значно спростити процес розробки програмних рішень, підвищити продуктивність праці розробника та забезпечити ефективне впровадження складних алгоритмів керування в системах автоматизації. Крім того, використання інтегрованих середовищ розробки сприяє підвищенню надійності програмного забезпечення завдяки наявності засобів контролю помилок, автоматичного тестування та документування програмних проєктів.

Інтегроване середовище розробки являє собою комплекс програмних засобів, призначених для написання, налагодження, компіляції та тестування програмного забезпечення. Використання ІСР значно спрощує процес створення програм, підвищує продуктивність розробки та забезпечує зручність роботи програміста. [7]

Комп'ютерна платформа, у межах якої виконується програмне забезпечення, являє собою сукупність апаратних та програмних ресурсів, необхідних для коректної роботи застосунків. До її складу входять:

- апаратне забезпечення;
- операційна система;
- програмні інтерфейси;
- засоби взаємодії із зовнішнім обладнанням.

Саме комп'ютерна платформа визначає функціональні можливості системи, швидкодію та сумісність програмного забезпечення із зовнішніми пристроями.

Типове інтегроване середовище розробки включає такі основні компоненти:

1. Текстовий редактор — використовується для написання програмного коду.
2. Компілятор або інтерпретатор — забезпечує перетворення програмного коду у виконуваний файл або його безпосереднє виконання.
3. Засоби автоматизації збірки — призначені для організації процесу компіляції та створення програмних модулів.

Сучасні ІСР підтримують велику кількість мов програмування. Одним із найпоширеніших інтегрованих середовищ для мов програмування C/C++ є Microsoft Visual Studio, яке забезпечує широкий набір інструментів для створення програмного забезпечення різного рівня складності.

Окремий клас інтегрованих середовищ становлять системи візуальної розробки, які дозволяють створювати програмне забезпечення за допомогою графічного інтерфейсу та блокових схем. Такий підхід значно спрощує проектування систем автоматичного керування та підвищує наочність програмної структури.

У середовищах візуального програмування використовується менша кількість мов програмування порівняно з текстовими середовищами. Найбільш поширеними є:

- SFC;
- LD;
- FBD;
- CFC;
- G;
- VisSim.

Серед наведених мов особливе місце займає мова графічного програмування G, яка широко застосовується для створення програм, що працюють із вимірювальним обладнанням, системами збору даних та автоматизованими системами керування.

Мова G використовується у програмному середовищі LabVIEW, яке є одним із найпоширеніших інструментів для розробки систем реального часу та автоматизованих вимірювальних комплексів. [8]

Крім програмного забезпечення, при розробці систем автоматичного керування електроприводами широко використовуються сучасні апаратні засоби, які забезпечують високошвидкісну обробку сигналів, реалізацію алгоритмів керування та взаємодію із зовнішнім обладнанням.

До таких засобів належать:

Програмовані логічні інтегральні схеми (FPGA)

FPGA дозволяють реалізовувати:

- високошвидкісну цифрову обробку сигналів;
- системи керування в режимі реального часу;

- генерацію ШІМ-сигналів;
- паралельну обробку даних;
- спеціалізовані цифрові алгоритми.

Основною перевагою FPGA є можливість реалізації складних алгоритмів із дуже високою швидкістю та мінімальними затримками обробки інформації.

Для створення автоматизованих систем керування та вимірювальних комплексів широко застосовуються модульні платформи PXI (PCI eXtensions for Instrumentation). PXI є промисловим стандартом модульного вимірювального обладнання, який поєднує:

- можливості промислових комп'ютерів;
- високошвидкісну шину передачі даних;
- спеціалізовані засоби синхронізації;
- тригерні механізми взаємодії між модулями.

Платформи PXI відрізняються високою продуктивністю, модульністю та можливістю інтеграції великої кількості вимірювальних і керуючих модулів у межах єдиної системи.

### **1.3 Програмно-апаратний комплекс**

З урахуванням поставлених задач, вимог до швидкодії, точності та роботи системи в режимі реального часу, оптимальною платформою для побудови автоматизованої системи керування електроприводом є програмно-апаратний комплекс компанії National Instruments на базі контролера PXI у поєднанні з графічним середовищем розробки LabVIEW. [9]

Як додаткове текстове інтегроване середовище розробки використовується Microsoft Visual Studio, що обумовлено його широкими можливостями у сфері кросплатформної взаємодії, підтримкою мов програмування C/C++ та наявністю розвинених засобів налагодження програмного забезпечення.

Обладнання на базі National Instruments характеризується високими технічними та функціональними можливостями, оскільки платформа PXI поєднує у

собі не лише засоби мікропроцесорного керування, а й FPGA-модулі, які забезпечують апаратне виконання алгоритмів у режимі реального часу.

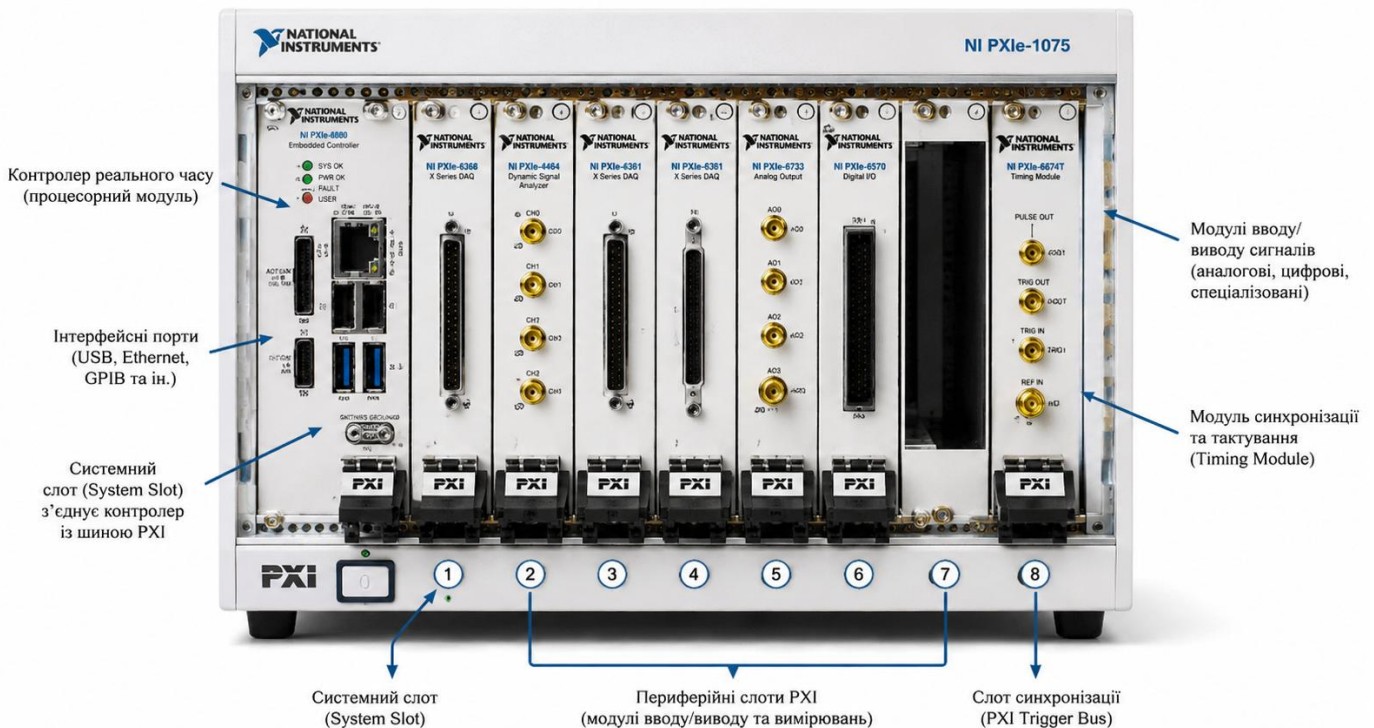


Рисунок 1.2 – Розташування модулів у платформі PXI

PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) являє собою високопродуктивну модульну платформу, призначену для створення автоматизованих вимірювальних, керуючих та випробувальних систем. PXI є відкритим промисловим стандартом, який широко використовується у сфері автоматизації, наукових досліджень та систем реального часу. [10]

Основою платформи PXI є високошвидкісні шини PCI та PCI Express, які мають:

- швидкий обмін даними між модулями;
- синхронізовану роботу всіх компонентів системи;
- підтримку тригерних та синхронізаційних сигналів.

Наявність спеціалізованих ліній синхронізації дозволяє реалізовувати складні багатоканальні системи керування та вимірювання з високою точністю часової координації.

Однією з ключових переваг PXI є модульний принцип побудови системи. Завдяки цьому користувач має можливість конфігурувати склад обладнання відповідно до вимог конкретної задачі. До складу системи можуть входити:

- модулі збору даних;
- FPGA-модулі;
- цифрові та аналогові модулі вводу/виводу;
- генератори сигналів;
- вимірювальні прилади;
- контролери реального часу.

Особливу роль у системах автоматичного керування відіграють модулі реконфігурованого вводу/виводу RIO (Reconfigurable Input/Output), у складі яких використовується FPGA. Застосування FPGA дозволяє реалізовувати високошвидкісну апаратну обробку сигналів, генерацію ШІМ-сигналів, цифрову фільтрацію та спеціалізовані алгоритми керування.

За допомогою модуля LabVIEW FPGA користувач може індивідуально налаштовувати цифрові лінії для роботи у різних режимах:

- входів та виходів;
- лічильників і таймерів;
- генераторів ШІМ;
- інтерфейсів енкодерів;
- спеціалізованих протоколів обміну даними.

Крім цього, FPGA забезпечує можливість реалізації вбудованих систем прийняття рішень, що працюють із апаратною швидкістю та високою надійністю.

Контролер PXI функціонує під керуванням операційної системи реального часу (ОСРЧ), яка спеціально призначена для виконання задач із жорсткими часовими обмеженнями.

Операційна система реального часу виконує ті самі функції, що і звичайна операційна система:

- управління апаратними ресурсами;
- планування задач;

- організація взаємодії програмних компонентів;
- забезпечення роботи прикладного програмного забезпечення.

Проте, на відміну від стандартних ОС, ОСРЧ гарантує визначений максимальний час виконання критичних операцій, що є надзвичайно важливим для систем автоматичного керування, вимірювання та обробки сигналів. [11]

У системах електропривода це особливо актуально, оскільки затримки у формуванні керуючих сигналів або обробці інформації від датчиків можуть призвести до:

- погіршення динамічних характеристик;
- втрати точності керування;
- аварійних режимів роботи;
- загрози безпеці обладнання та персоналу.

Використання ОСРЧ дозволяє забезпечити:

- стабільний час виконання програм;
- пріоритетне виконання критичних задач;
- мінімальні часові затримки;
- високу надійність функціонування системи.

Програмне забезпечення системи розробляється у середовищі LabVIEW, яке є кросплатформною графічною системою програмування, створеною на основі мови G. Основою функціонування LabVIEW є парадигма потоків даних (Dataflow Programming). [12]

У даній моделі виконання програми визначається не послідовністю команд, а наявністю даних на входах функціональних вузлів. Вузол виконує обчислення лише після надходження всіх необхідних вхідних даних.

Кожен вузол можна розглядати як функціональний блок, що:

- приймає вхідні дані;
- виконує обробку;
- формує результати на виході.

Передача інформації між вузлами здійснюється за допомогою з'єднувальних ліній, якими передаються так звані токени даних.

LabVIEW підтримує широкий спектр апаратного забезпечення та містить численні бібліотеки:

- віддаленого керування обладнанням;
- робототехніки;
- візуалізації даних;
- роботи з базами даних;
- генерації звітів;
- інтеграції з іншими програмними продуктами.

Завдяки поєднанню PXI-платформи, FPGA-модулів, операційної системи реального часу та середовища LabVIEW забезпечується створення високопродуктивної автоматизованої системи керування електроприводом, здатної працювати в режимі реального часу.

#### **1.4 Висновки до розділу**

У даному розділі розглянуто основні характеристики, структуру та принципи функціонування сучасних електроприводів. Проаналізовано класифікацію електроприводів за різними ознаками, а також їх основні статичні, механічні, електромеханічні та динамічні властивості.

Розглянуто сучасні підходи до побудови автоматизованих систем управління двигунами, зокрема використання напівпровідникових силових перетворювачів, мікропроцесорних засобів та цифрових систем керування. Встановлено, що застосування сучасної елементної бази дозволяє підвищити енергоефективність, точність регулювання та надійність роботи електроприводних систем.

Також було проаналізовано інструментальні засоби розробки програмного забезпечення для автоматизованих систем керування та спеціалізовані апаратні платформи. Обґрунтовано доцільність використання програмно-апаратного комплексу на базі платформи PXI та середовища LabVIEW, які забезпечують високу продуктивність, модульність, можливість роботи в режимі реального часу та гнучкість при створенні систем керування електроприводами.

## 2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Основні вимоги до системи керування електроприводом.

У сучасних умовах розвитку промисловості, автоматизації виробництва та розробка інтелектуальних систем управління є одним із найважливіших елементів технологічного обладнання. Саме електропривод забезпечує перетворення електричної енергії у механічний рух та реалізує керування технологічними процесами відповідно до заданих параметрів. Тому до електроприводів висувається широкий спектр вимог, які визначають ефективність, стабільність і безпечність їх роботи.

Однією з головних вимог до електроприводу є його надійність. Під надійністю розуміють здатність системи безвідмовно виконувати свої функції впродовж визначеного часу та в заданих умовах експлуатації. Надійний електропривод повинен забезпечувати стабільну роботу обладнання навіть за наявності зовнішніх впливів, перевантажень або змін режимів роботи.

Надійність є базовим критерієм оцінювання будь-якої системи, оскільки навіть високі показники точності чи швидкодії втрачають своє значення у випадку частих відмов або нестабільної роботи приводу. Особливо важливою ця вимога є для систем безперервного виробництва, транспортних механізмів, медичного обладнання та інших відповідальних об'єктів.

Важливою характеристикою електроприводу є точність виконання заданих параметрів руху. Основне призначення електроприводу полягає у забезпеченні керованого механічного руху з мінімальними відхиленнями від заданих значень швидкості, положення, прискорення або моменту.

Точність електроприводу визначається величиною допустимої похибки. Наприклад, у ліфтових установках відхилення кабіни під час зупинки не повинно перевищувати декількох міліметрів, тоді як у високоточному технологічному обладнанні похибка позиціонування може вимірюватися мікрометрами.

Крім цього, електропривод повинен підтримувати стабільність технологічних параметрів незалежно від зміни навантаження чи зовнішніх умов. Це особливо актуально для конвеєрних систем, намотувальних механізмів, роботизованих комплексів та верстатів із ЧПУ.

У деяких системах, наприклад у приводах антен, робототехнічних комплексах або системах стабілізації, реакція повинна відбуватися за доли секунди. Водночас надмірна швидкість зміни режимів може негативно впливати на комфорт або безпечність експлуатації. Наприклад, занадто різкий розгін транспортного засобу створює дискомфорт для пасажирів.

Отже, швидкодія повинна забезпечувати оптимальний баланс між оперативністю реагування та плавністю роботи системи.

Якість динамічних процесів визначає характер зміни параметрів електроприводу в перехідних режимах — під час пуску, гальмування, зміни навантаження або напрямку руху.

Висока якість динаміки передбачає плавність розгону та гальмування, відсутність значних коливань швидкості, ривків і перевантажень. Це має особливе значення для ліфтів, кранів, транспортних систем та іншого обладнання, де комфорт і безпечність роботи є пріоритетними.

Крім того, правильна організація динамічних процесів дозволяє зменшити механічний знос обладнання та підвищити довговічність усієї системи.

У сучасних умовах значна увага приділяється енергетичній ефективності електроприводів. Будь-яке перетворення енергії супроводжується певними втратами, тому важливо мінімізувати споживання електроенергії та підвищити ККД системи.

Енергетична ефективність оцінюється кількістю енергії, необхідної для виконання певного технологічного процесу. Наприклад, у промислових установках важливим показником є витрата електроенергії на одиницю готової продукції.

Використання систем управління, частотних перетворювачів та енергоощадних двигунів дозволяє суттєво зменшити втрати енергії та підвищити економічність роботи обладнання.

Сучасний електропривід повинен бути сумісним із системою електропостачання та інформаційними системами керування вищого рівня. Особливо це стосується електроприводів із напівпровідниковими перетворювачами, які можуть створювати гармонічні спотворення в мережі живлення.

Несумісність електроприводу з іншими елементами системи може призводити до появи електромагнітних завад, порушення роботи автоматизованих систем керування та зниження загальної надійності обладнання.

Тому важливим завданням є забезпечення електромагнітної сумісності, стабільності роботи та можливості інтеграції електроприводу в сучасні автоматизовані комплекси.

Ресурсоємність характеризує витрати матеріальних, енергетичних і трудових ресурсів на виготовлення, монтаж, експлуатацію та ремонт електроприводу.

Сучасні тенденції розвитку техніки передбачають створення компактних, економічних і технологічних систем, які потребують мінімальних витрат на обслуговування та мають тривалий термін служби.

Зменшення ресурсоємності дозволяє підвищити економічну ефективність виробництва та знизити собівартість продукції.

Зі зростанням складності електроприводів та вимог до їх функціонування значно підвищилися вимоги до систем керування. Сучасні системи управління будуються на основі мікропроцесорної техніки, що забезпечує високу продуктивність, гнучкість налаштування та можливість реалізації складних алгоритмів керування.

Основними вимогами до систем керування електроприводами є:

1. Мінімальний час реакції системи — забезпечення швидкого реагування на зміну режимів роботи або зовнішніх впливів.
2. Висока точність формування ШІМ-сигналів — необхідна для ефективного керування силовими перетворювачами та електродвигунами.
3. Рівномірність формування керуючих сигналів — забезпечує стабільність роботи приводу та зменшує пульсації моменту.

4. Можливість зміни алгоритмів керування в реальному часі — дозволяє адаптувати систему до різних режимів роботи та технологічних процесів.
5. Мінімальний час обробки інформації від датчиків — підвищує точність та швидкодію системи.
6. Висока відмовостійкість — система повинна зберігати працездатність навіть за виникнення окремих несправностей або збоїв.

## **2.2 Структурна схема пристрою управління індукторним двигуном подвійного живлення**

До складу досліджуваного об'єкта входить індукторний електропривід подвійного живлення (ІДПЖ), який включає електродвигун, цифровий датчик кутового положення ротора, датчики струму, силові модулі інверторів, механічне навантаження та апаратно-програмний комплекс компанії National Instruments. Основою системи є модульна платформа PXI-1042, у складі якої використовується вбудований контролер PXI-8106RT, призначений для роботи в режимі реального часу.

Контролер PXI RT здійснює взаємодію з модулями системи через високошвидкісну шину PXIe, яка є вдосконаленою версією стандартної комп'ютерної шини PCI та забезпечує швидкий обмін даними між компонентами системи. У платформі встановлені багатофункціональні модулі вводу/виводу NI PXI-7811R та NI PXI-7833R, побудовані на базі FPGA-технології, що дозволяє реалізовувати високошвидкісну обробку сигналів та алгоритми керування у реальному часі.

Модуль NI PXI-7833R, залежно від конфігурації, містить 8 каналів аналогового вводу/виводу та 96 цифрових ліній вводу/виводу. Модуль NI PXI-7811R оснащений 132 цифровими лініями вводу/виводу для кожного з підключених роз'ємів. Використання FPGA-модулів дозволяє реалізувати високоточне формування сигналів керування, обробку інформації від датчиків та генерацію сигналів широтно-імпульсної модуляції з мінімальними затримками.

Індукторний електропривід подвійного живлення з фазозалежним керуванням, структурна схема якого представлена на рисунку 2.1, являє собою складну електромеханічну систему, що складається з електродвигуна та комплексу силових і керуючих пристроїв. Особливістю даного електропривода є наявність двох незалежних трифазних статорних обмоток, кожна з яких живиться від окремого автономного інвертора напруги. Така структура дозволяє незалежно формувати параметри живлення для кожної обмотки та забезпечувати розширені можливості керування електромагнітними процесами в машині.

Кожен інвертор працює під керуванням власної системи керування, яка формує необхідні сигнали перемикання силових ключів для створення напруг заданої амплітуди, частоти та фази. Узгоджена робота обох інверторів забезпечує формування результуючого магнітного поля в електродвигуні та створення необхідного електромагнітного моменту.

До складу системи входить блок задання, призначений для формування керуючих впливів відповідно до заданих режимів роботи електропривода. У цьому блоці визначаються закони зміни амплітуд, частот і фазових зсувів напруг живлення залежно від необхідних значень кутового положення та швидкості обертання ротора. Сформовані сигнали надходять до блоку розподілу керування, який здійснює їх обробку та генерує окремі сигнали управління для кожного інвертора відповідно до обраного алгоритму керування.

Для забезпечення роботи системи в замкненому контурі керування використовується датчик кутового положення ротора, сигнал якого надходить до системи керування та використовується для реалізації зворотного зв'язку. Наявність зворотного зв'язку дозволяє контролювати поточний стан електропривода, коригувати керуючі впливи та забезпечувати високу точність підтримання заданих координат руху.

Крім того, структурна схема містить механічне навантаження, яке моделює реальні умови експлуатації електропривода та дозволяє досліджувати його характеристики при різних режимах роботи. Загальна структура системи

індукторного електропривода подвійного живлення з фазозалежним керуванням наведена на рисунку 2.1.

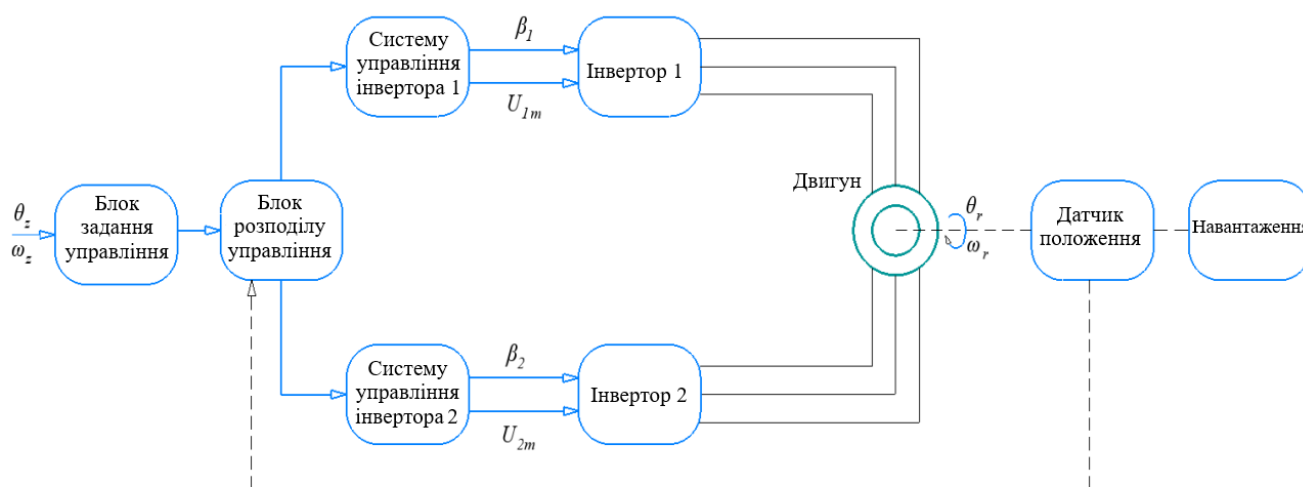


Рисунок 2.1 – Структурна схема індукторного електроприводу подвійного живлення з фазозалежним керуванням

Для створення системи керування та організації збору даних на базі модуля NI PXI-7833R використовується програмний модуль LabVIEW FPGA, який функціонує у складі середовища графічного програмування LabVIEW. Даний програмний засіб надає можливість розробки та реалізації алгоритмів безпосередньо на програмованій логічній інтегральній схемі (FPGA), що входить до складу модуля.

Використання технології FPGA-програмування дозволяє реалізовувати високошвидкісні алгоритми цифрового керування, здатні працювати з жорсткими часовими обмеженнями та забезпечувати виконання операцій із мінімальними затримками. На відміну від традиційних програмних рішень, що виконуються центральним процесором, алгоритми, реалізовані на FPGA, працюють паралельно на апаратному рівні, що суттєво підвищує продуктивність системи та забезпечує детермінованість виконання обчислювальних процесів.

Застосування модуля LabVIEW FPGA дає можливість реалізувати функції формування сигналів керування, обробки даних із датчиків, генерації імпульсних послідовностей, а також виконання математичних операцій у режимі реального часу. Це особливо важливо для систем керування електроприводами, де точність та

швидкодія алгоритмів безпосередньо впливають на якість регулювання координат руху та динамічні характеристики системи.

Крім того, використання FPGA-технологій забезпечує високу надійність функціонування системи, можливість реалізації складних алгоритмів цифрової обробки сигналів та гнучкість модернізації програмного забезпечення без внесення змін до апаратної структури пристрою. Завдяки цьому модуль NI PXI-7833R може ефективно використовуватись для побудови високопродуктивних систем автоматичного керування та дослідницьких стендів реального часу.

Програмне забезпечення, створене у середовищі LabVIEW, має ієрархічну структуру та складається з набору віртуальних інструментів, розташованих на персональному комп'ютері, контролері PXI та FPGA-модулях вводу/виводу. Загальна структура програмного проекту наведена на рисунку 2.2.

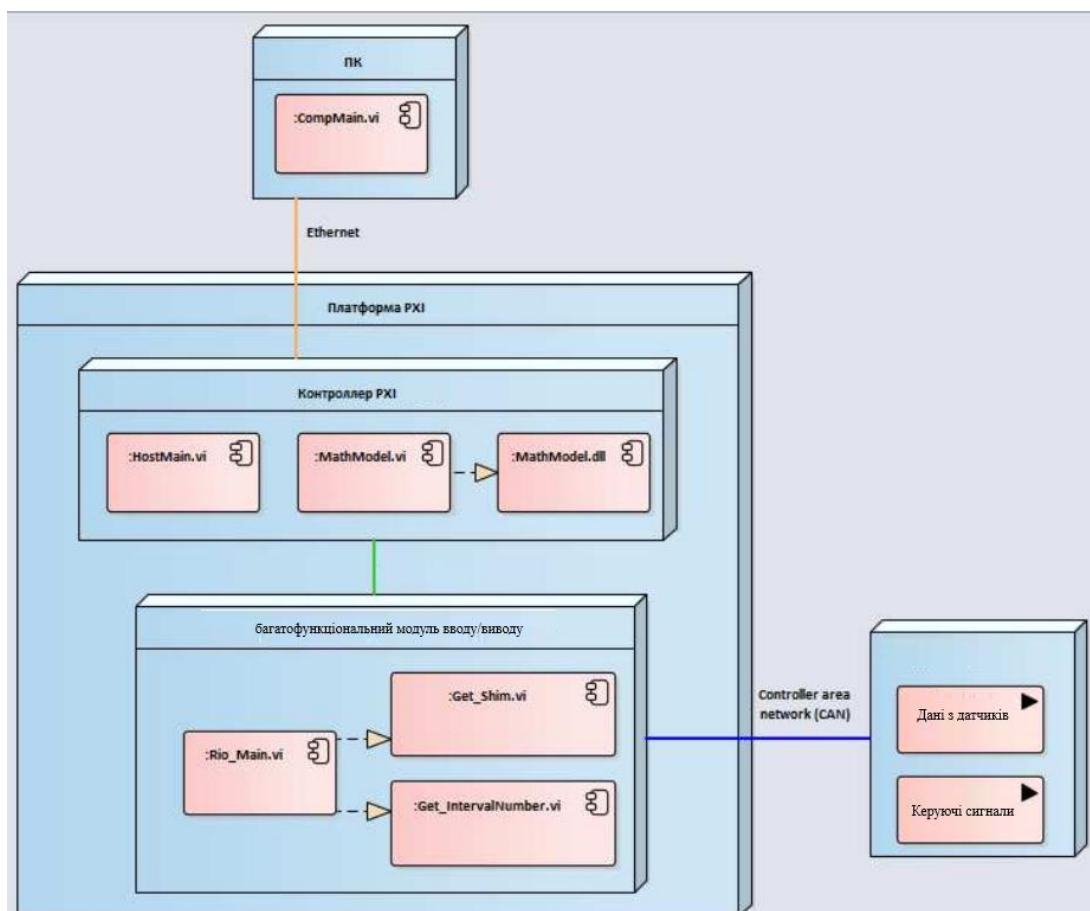


Рисунок 2.2 – Діаграма розгортки проекту

Програмні модулі, реалізовані на контролері реального часу та FPGA-модулях, забезпечують безперервне функціонування системи керування в режимі реального часу. До їх основних функцій належать збір і обробка сигналів від вимірювальних датчиків, виконання алгоритмів керування електроприводом, а також формування керуючих впливів для силової частини системи.

На основі інформації, отриманої від датчиків струму, напруги та кутового положення ротора, програмне забезпечення виконує необхідні обчислення та формує сигнали керування інверторами. Це дозволяє забезпечити підтримання заданих режимів роботи електропривода та реалізувати алгоритми регулювання координат руху з високою точністю.

Одним із ключових завдань програмних модулів є формування синусоїдальних струмів у двох трифазних статорних обмотках індукторного двигуна подвійного живлення. Для цього використовуються алгоритми широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), які забезпечують перетворення керуючих сигналів у послідовність імпульсів для силових ключів інверторів. Завдяки зміні тривалості імпульсів формується вихідна напруга необхідної форми та амплітуди, що дозволяє отримати струми, близькі до синусоїдальних.

Застосування ШІМ забезпечує високу точність регулювання електромагнітних процесів у двигуні, зменшення гармонічних спотворень струмів і напруг, а також підвищення енергетичної ефективності системи. Крім того, використання FPGA-модулів для реалізації алгоритмів модуляції дозволяє виконувати обробку сигналів та формування керуючих імпульсів із мінімальними часовими затримками, що є важливою умовою стабільної роботи електропривода в режимі реального часу.

Завдяки спільній роботі контролера реального часу та FPGA-модулів забезпечується високошвидкісне виконання алгоритмів керування, надійна обробка інформації від датчиків і якісне формування струмів у статорних обмотках двигуна, що позитивно впливає на динамічні та енергетичні характеристики електропривода.

## 2.3 Математична модель двигуна подвійного живлення

Розроблений математичний опис двигуна подвійного живлення являє собою сукупність взаємопов'язаних математичних моделей, які забезпечують можливість дослідження, аналізу та проектування електроприводу на єдиній методологічній основі. Використання комплексного математичного апарату дозволяє виконувати моделювання електромеханічних процесів, оцінювати режими роботи системи та здійснювати синтез алгоритмів керування.

Загальна схема підключення двигуна подвійного живлення (ДПЖ) наведена на рисунку 2.3. Як джерела живлення у системі використовуються автономні інвертори напруги, що забезпечують формування необхідних параметрів живлення для обох статорних обмоток двигуна.

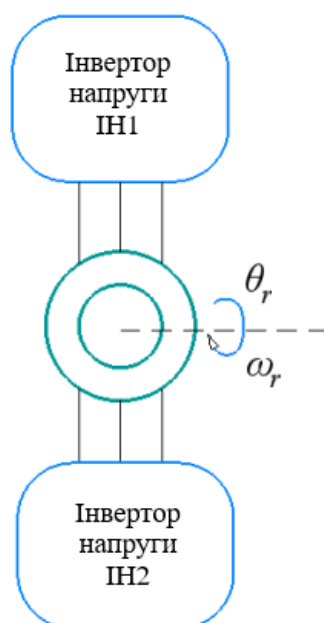


Рисунок 2.3 – Схема підключення ДПЖ

Для дослідження електромагнітних процесів використовується схема заміщення ДПЖ, наведена на рисунку 2.4. Дана схема відображає взаємозв'язок між електричними параметрами обмоток двигуна, а також враховує взаємні електромагнітні зв'язки між ними.

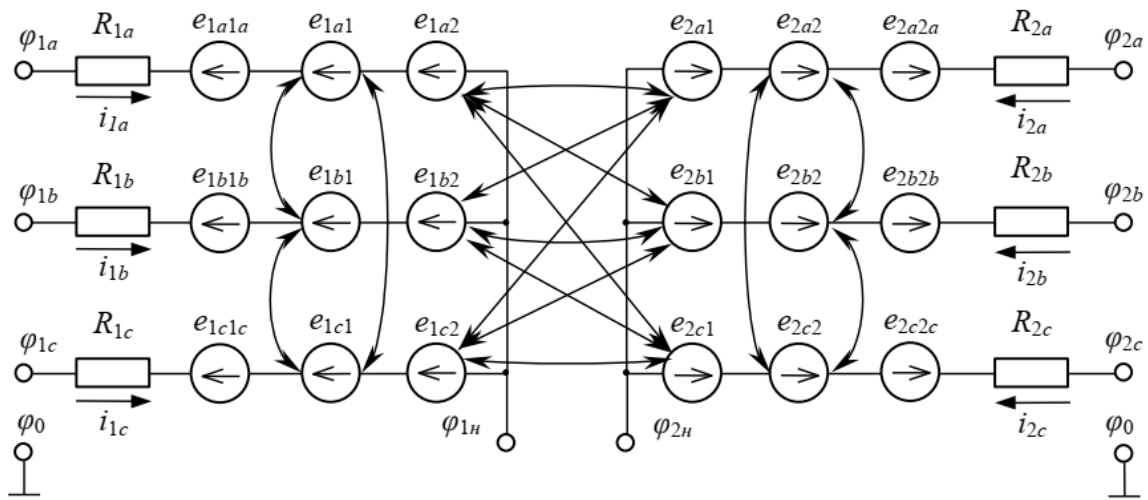


Рисунок 2.4 – Схема заміщення ДПЖ.

Математична модель механічного навантаження, яка описується рівнянням руху, розглядається окремо від електромагнітної моделі двигуна. У зв'язку з цим основною вихідною величиною електромагнітної моделі є електромагнітний обертальний момент, який передається до моделі механічного навантаження. У свою чергу, модель навантаження формує значення кута повороту ротора та його кутової швидкості, які використовуються як вхідні параметри для моделі двигуна.

У якості змінних стану системи прийнято потокозчеплення та струми обмоток, що пов'язані між собою через власні та взаємні індуктивності. Вхідними величинами моделі, крім керуючих сигналів у вигляді електричних потенціалів на затискачах обмоток, є також кут повороту ротора та кутова швидкість, які надходять із моделі механічного навантаження.

Для опису електромагнітних процесів використовується система власних координат обмоток двигуна подвійного живлення, що наведена на рисунку 2.5. Такий підхід дозволяє більш точно враховувати взаємодію магнітних полів та особливості конструкції двигуна.

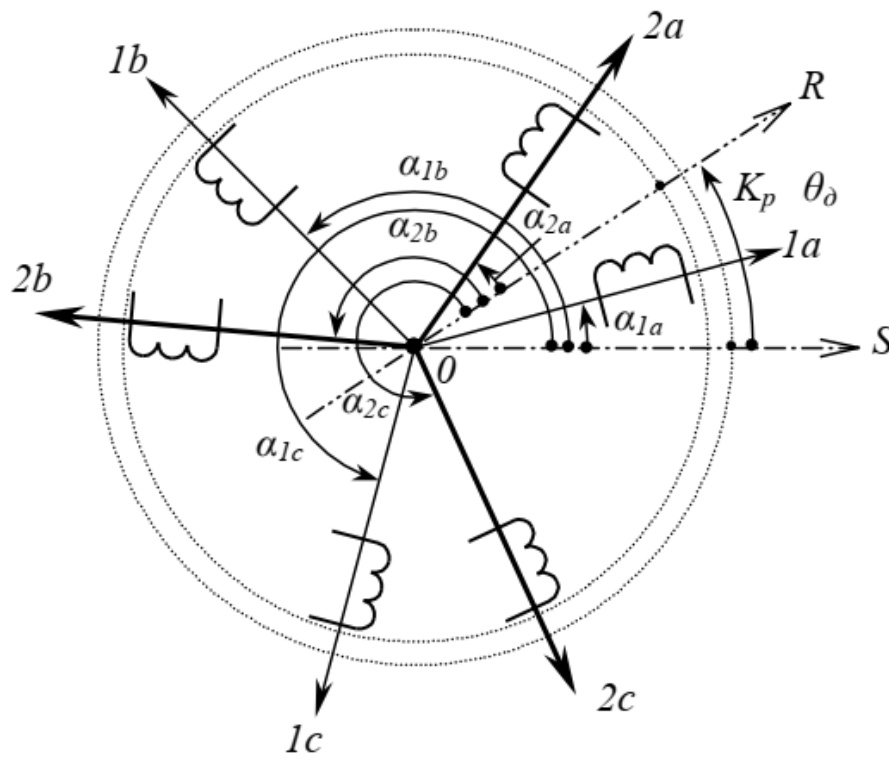


Рисунок 2.5 – Система власних координат обмоток двигуна подвійного живлення

У процесі дослідження було розглянуто два підходи до побудови математичної моделі двигуна. Перший підхід передбачає використання несиметричної моделі, яка враховує реальні особливості схеми з'єднання обмоток та можливу асиметрію параметрів системи. Другий підхід базується на використанні симетричної моделі, яка значно спрощує математичний опис і застосовується для аналітичних розрахунків, дослідження режимів роботи та синтезу систем керування.

Для практичної реалізації системи керування із застосуванням мікроконтролерних засобів найбільш доцільним є використання симетричної моделі, оскільки вона потребує менших обчислювальних ресурсів та забезпечує достатню точність розрахунків у реальному часі.

На основі прийнятої моделі були сформовані рівняння електричної рівноваги для першої та другої статорних обмоток двигуна, а також отримано вираз для визначення електромагнітного обертового моменту:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{\psi}_{\delta 1}}{dt} = -R_1 \bar{i}_{\delta 1} + \bar{\varphi}_{\delta 1} \\ \frac{d\bar{\psi}_{\delta 2}}{dt} = -R_2 \bar{i}_{\delta 2} + \bar{\varphi}_{\delta 2} \\ M_{\delta} = 0,5 \frac{d}{d\theta_{\delta}} \left[ \bar{\psi}_{\delta 1}^T \bar{i}_{\delta 1} + \bar{\psi}_{\delta 2}^T \bar{i}_{\delta 2} \right] \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Електромагнітний момент двигуна визначається як похідна електромагнітної енергії системи за кутом повороту ротора, що дозволяє враховувати взаємодію магнітних потоків та електромеханічне перетворення енергії у двигуні подвійного живлення.

$$M_{\delta} = \frac{d}{d\theta_{\delta}} \left[ 0,5 \sum_{k=1a}^{k=2c} \psi_k i_k \right] \quad (2.2)$$

2.3.1 Математична модель двигуна подвійного живлення в єдиній системі обертових координат

Для побудови математичної моделі двигуна подвійного живлення (ДПЖ) доцільно використовувати синхронну систему координат, яка обертається з кутовою швидкістю вектора однієї з живильних напруг. Такий підхід дозволяє суттєво спростити математичний опис електромагнітних процесів, зменшити кількість змінних параметрів у рівняннях та підвищити ефективність аналізу режимів роботи електроприводу.

Використання єдиної обертової системи координат забезпечує можливість представлення змінних струмів, поточозчеплень та напруг у вигляді постійних або повільно змінних величин у сталому режимі роботи. Це значно спрощує дослідження динамічних процесів та подальший синтез систем керування двигуном.

На рисунку 2.8 наведено власні координати обмоток двигуна подвійного живлення, а на рисунку 2.9 — єдину систему обертових координат, яка використовується для побудови математичної моделі.

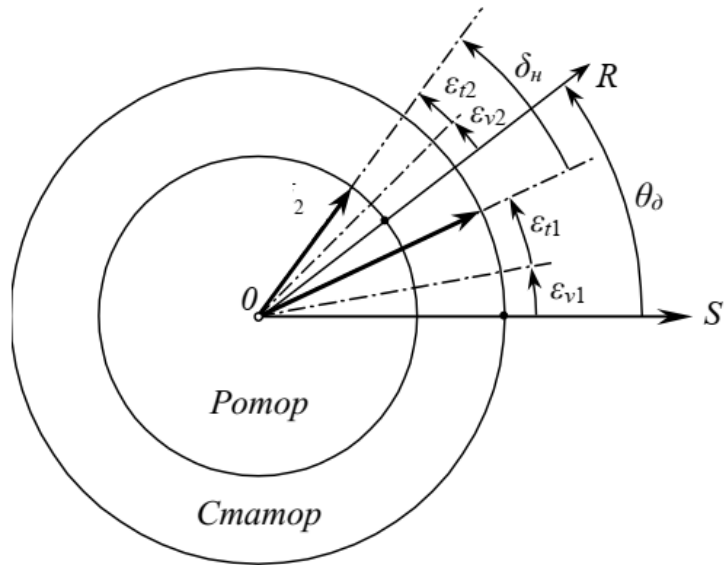


Рисунок 2.8 – Власні координати обмоток

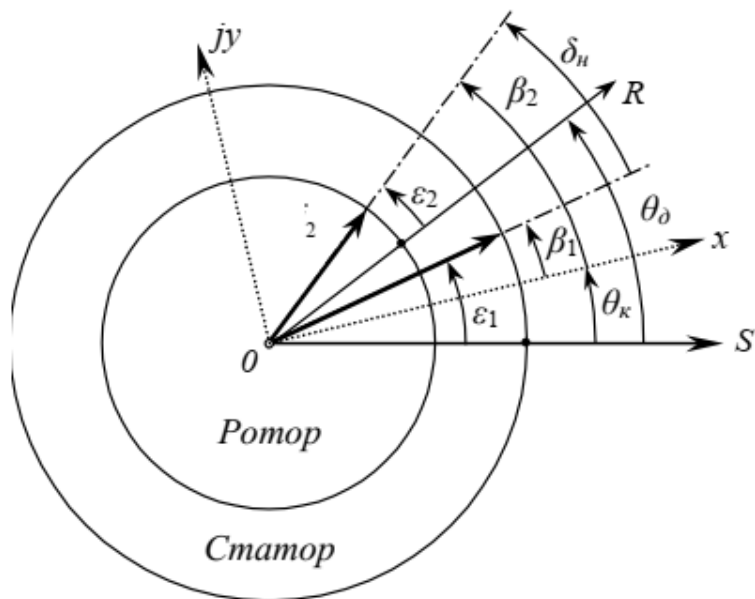


Рисунок 2.9 – Єдина система обертових координат

Разом із тим застосування системи відносних одиниць під час дослідження електропривода в цілому має певні складнощі. Для аналізу повної системи необхідно вводити велику кількість базових величин для всіх параметрів, які використовуються у функціональних блоках електроприводу. Це ускладнює практичне використання моделі при дослідженні комплексних режимів роботи.

У зв'язку з цим система відносних одиниць використовується переважно для аналізу характеристик окремого двигуна подвійного живлення, тоді як при дослідженні електроприводу загалом застосовується математична модель у фізичних одиницях.

Таким чином, система диференціальних рівнянь двигуна подвійного живлення у векторній формі, записана у синхронній системі координат та у відносних одиницях, має відповідний вигляд.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{\psi}_{\delta 1}}{dt} = -(\alpha_1 + j\omega_1)\bar{\psi}_1 + \alpha_1 k_2 \bar{\psi}_2 + \bar{u}_1 \\ \frac{d\bar{\psi}_{\delta 2}}{dt} = -[\alpha_2 + j(\omega_1 - \omega_\delta)]\bar{\psi}_2 + \alpha_2 k_1 \bar{\psi}_1 + \bar{u}_2 \\ M_\delta = \frac{L_m}{J\sigma L_1 L_2} \operatorname{Im} \left[ \bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2^* \right] \end{array} \right. \quad (2.3)$$

У проекціях на осі ( $[x, y]$ ) математична модель двигуна подвійного живлення може бути представлена системою рівнянь, що описують взаємозв'язок між струмами, потокозчепленнями, напругами та електромагнітним моментом двигуна.:

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

Отримана математична модель є базовою для подальшого синтезу спрощених та лінеаризованих моделей ДПЖ, які використовуються при розробці систем

автоматичного керування, дослідженні динамічних режимів роботи та реалізації алгоритмів цифрового керування електроприводом.

### 2.3.2 Спрощена нелінійна модель ДПЖ

Основною метою спрощення математичної моделі двигуна подвійного живлення (ДПЖ) є підвищення зручності проведення аналітичних досліджень, зменшення часу чисельного моделювання та покращення наочності при аналізі електромеханічних процесів. Крім того, спрощення моделі дозволяє більш ефективно виявляти загальні закономірності роботи електроприводу та використовувати отримані результати для подальшого синтезу системи керування.

У випадку одноканального керування, коли змінюється лише одна з напруг живлення двигуна, можливо знехтувати перехідними процесами в обмотці, параметри живлення якої залишаються незмінними. Такий підхід дозволяє суттєво знизити порядок системи диференціальних рівнянь і, відповідно, спростити математичний опис електромагнітних процесів.

Можливість застосування такого спрощення підтверджується результатами моделювання повної математичної моделі двигуна при стрибкоподібній зміні частоти напруги другої обмотки за незмінних параметрів напруги першої обмотки. Аналіз отриманих результатів показав, що зміни потокозчеплень першої обмотки при коливаннях кутової швидкості та кута навантаження є незначними, що дозволяє вважати їх практично сталими величинами.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\bar{\psi}_2}{dt} = \left\{ \alpha_2 \left[ 1 - \frac{\alpha_1^2 k_1 k_2}{\alpha_1^2 + \omega_{10}^2} \right] + j \left[ \left( 1 + \frac{\alpha_1 \alpha_2 k_1 k_2}{\alpha_1^2 + \omega_{10}^2} \right) \omega_{10} - \omega_0 \right] \right\} \bar{\psi}_2 + \left[ \frac{\alpha_1 \alpha_2 k_1}{\alpha_1^2 + \omega_{10}^2} - j \frac{\alpha_2 k_1 \omega_{10}}{\alpha_1^2 + \omega_{10}^2} \right] \bar{U}_{10} + \bar{u}_2 \\ M = \frac{L_m}{\sigma L_1 L_2} \operatorname{Im} \left\{ \frac{\alpha_1 - j \omega_{10}}{\alpha_1^2 + \omega_{10}^2} \bar{U}_{10}^* \bar{\psi}_2 - j \frac{\alpha_1 k_2 \omega_{10}}{\alpha_1^2 + \omega_{10}^2} |\bar{\psi}_2|^2 \right\} \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Для оцінювання точності отриманої спрощеної нелінійної моделі було проведено моделювання електромеханічних процесів у двигуні подвійного

живлення при стрибкоподібній зміні частоти напруги живлення другої обмотки в межах від 0,1 до 0,3 відносних одиниць частоти.

Порівняння результатів моделювання повної та спрощеної моделей показало, що похибка спрощення для миттєвого значення кутової швидкості не перевищує 3 %, а для кута навантаження — 8 %. При цьому періоди коливань перехідних процесів практично збігаються, що свідчить про достатню точність спрощеної моделі для дослідження динамічних режимів роботи електроприводу.

Отримана нелінійна модель може використовуватись як для автономного моделювання двигуна подвійного живлення, так і для дослідження його роботи у складі електроприводу. З урахуванням співвідношення між точністю та швидкістю обчислень дана модель є оптимальною для практичного застосування при розробці систем автоматичного керування.

Для чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь використовується метод Рунге–Кутти четвертого порядку точності. У загальному вигляді задача розв'язання диференціального рівняння може бути записана таким чином:

$$y' = f(x, y), y(x_0) = y_0$$

Наближене значення функції у наступній точці визначається за ітераційною формулою з фіксованим кроком інтегрування ( $h$ ):

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

Обчислення коефіцієнтів ( $k_1$ ), ( $k_2$ ), ( $k_3$ ) та ( $k_4$ ) виконується послідовно на кожному кроці інтегрування відповідно до алгоритму методу Рунге–Кутти.

$$\begin{aligned} K_1 &= f(x_n, y_n) \\ K_2 &= f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} K_1\right) \\ K_3 &= f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} K_2\right) \\ K_4 &= f(x_n + h, y_n + h K_3) \end{aligned} \tag{2.6}$$

Метод Рунге–Кутти є одним із найпоширеніших чисельних методів розв’язання систем диференціальних рівнянь у технічних застосуваннях. Його широке використання пояснюється високою точністю, стійкістю та наявністю великої кількості готових програмних реалізацій для різних мов програмування та систем математичного моделювання.

У задачах, де необхідна підвищена точність розрахунків, можуть застосовуватися методи п’ятого та шостого порядків. Проте реалізація таких алгоритмів супроводжується суттєвим збільшенням обчислювальної складності та часу виконання розрахунків.

У випадку реалізації алгоритмів на системах реального часу можливість використання методів вищих порядків обмежується вимогами до швидкодії та часу реакції системи керування. Тому метод Рунге–Кутти четвертого порядку є оптимальним компромісом між точністю розрахунків і швидкістю виконання обчислень у системах керування електроприводами

## **2.4 Висновки до розділу**

У даному розділі було розглянуто основні принципи побудови системи керування індукторним електроприводом подвійного живлення, визначено вимоги до сучасних електроприводів та виконано розробку структурної і математичної моделей системи.

Було розроблено структурну схему ІДПЖ з фазозалежним керуванням, яка включає дві трифазні статорні обмотки, окремі інвертори напруги, систему формування керуючих сигналів, датчики зворотного зв’язку та механічне навантаження. Використання FPGA-технологій забезпечує мінімальні затримки при формуванні ШІМ-сигналів, високу точність керування та можливість реалізації складних алгоритмів цифрової обробки сигналів.

Побудовано математичну модель двигуна подвійного живлення у власній та єдиній системі обертових координат. Отримані рівняння дозволяють описувати електромагнітні процеси в двигуні, враховувати взаємозв’язок між

потокочепленнями, струмами та електромагнітним моментом. Для підвищення ефективності чисельного моделювання була сформована спрощена нелінійна модель ДПЖ, яка забезпечує достатню точність при суттєвому зменшенні обчислювальної складності.

Для чисельного розв'язання системи диференціальних рівнянь обрано метод Рунге–Кутти четвертого порядку точності, який забезпечує оптимальне співвідношення між точністю та швидкістю обчислень у системах реального часу.

### **3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ**

#### **3.1 Розробка системи управління електроприводом**

Елементна база, що використовується в ході вирішення поставленого завдання, являє собою програмно-апаратний комплекс, до складу якого входить об'єкт дослідження (індукторний електропривод подвійного живлення, що включає ІДПЖ, цифровий датчик положення, датчики струму, силові модулі інверторів, механічне навантаження) і апаратуру компанії National Instruments (NI), малюнок 10. Модульна платформа NI PXI-1042, обрана в якості основи створеного програмно-апаратного комплексу, дозволяє легко змінювати свою структуру за допомогою модулів відповідно до потреб користувача і має досить високу продуктивність для обробки великих масивів даних. Використовуваний в NI PXI-1042 вбудований контролер NI PXI-8106RT поставляється з операційною системою реального часу ОСРЧ для створення систем вимірювання та управління

Контролер NI PXI-8106RT за допомогою шини PXI, яка є вдосконаленим варіантом комп'ютерної шини PCI, взаємодіє з модулями, встановленими на шасі, зокрема, багатофункціональним модулем вводу/виводу NI PXI-7833R (рис. 2). Даний модуль апаратно реалізований на (FPGA) і має 8 каналів аналогового вводу, 8 каналів аналогового виводу і 96 цифрових ліній вводу/виводу.

При розробці схем управління і збору даних використовується LabVIEW FPGA в середовищі графічного програмування National Instruments LabVIEW.

Програмне забезпечення в LabVIEW складається з пов'язаних модулів, які знаходяться на ПК оператора, контролері NI PXI-8106 RT і модулі вводу/виводу NI PXI-7833R.

#### **3.2 Програмне забезпечення установки**

Найбільшу частину використовуваного ПЗ для реалізації системи управління складають програмні продукти компанії National Instruments. Для діагностики та

налаштування як апаратного, так і програмного забезпечення компанією National Instruments передбачено таке програмне забезпечення: Measurement & Automation Explorer (MAX) рисунок 3.1.

У Measurement & Automation explorer також вказані додаткові програмні модулі, що використовуються для розширення функціоналу системи, пристрої та інтерфейси, підключені до системи.

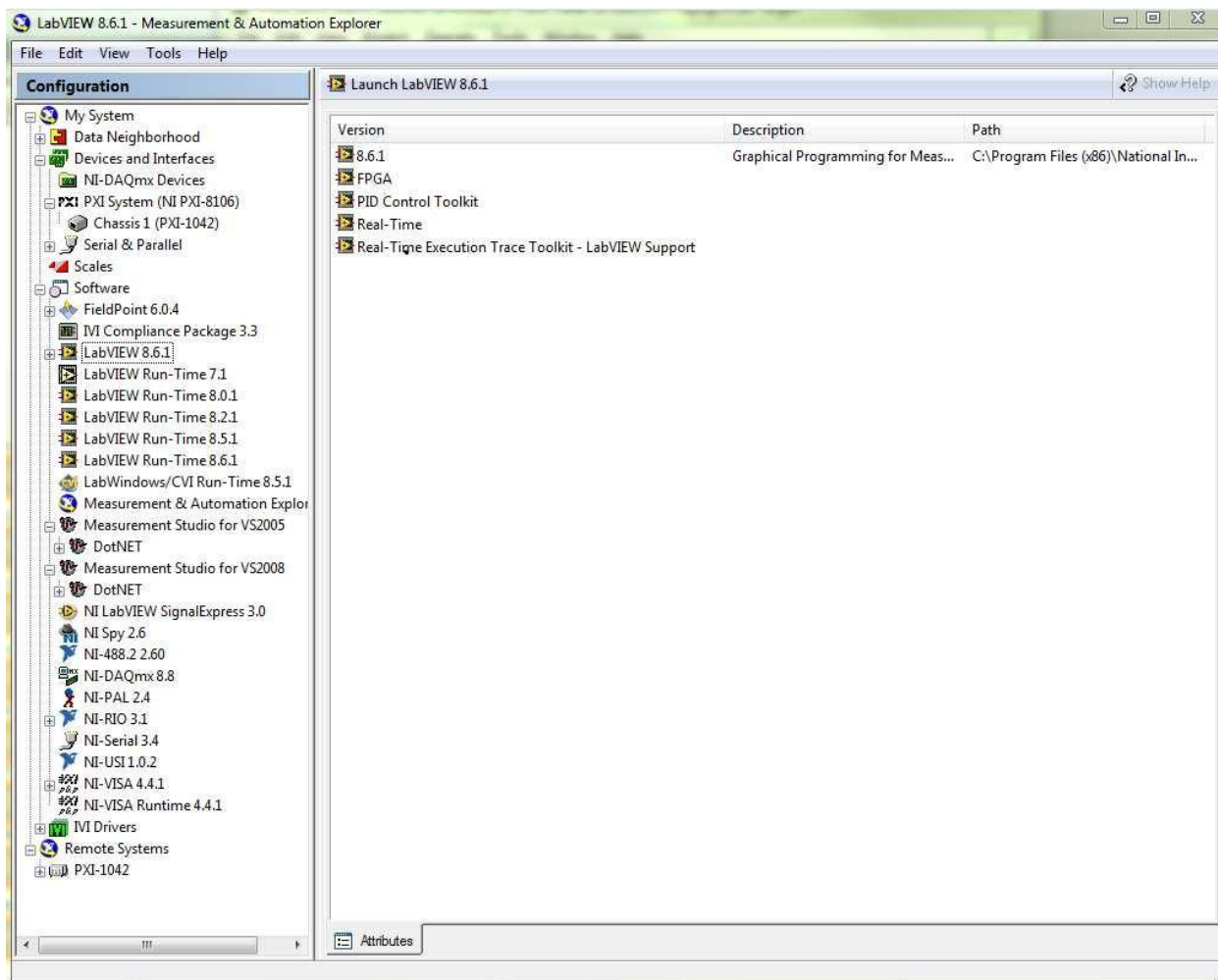


Рисунок 3.1 – Measurement & Automation explorer

Програмне забезпечення реалізовано у вигляді єдиного проекту, представленого набором різних віртуальних інструментів, розташованих на комп'ютері.

В якості додаткової ІСР використовується Microsoft Visual Studio, необхідна для створення динамічно підключаємої бібліотеки (DLL), в якій реалізований

алгоритм розрахунку математичної моделі ДПЖ, у вигляді системи диференціальних рівнянь. Оглядач проекту представлено на рисунку 3.2

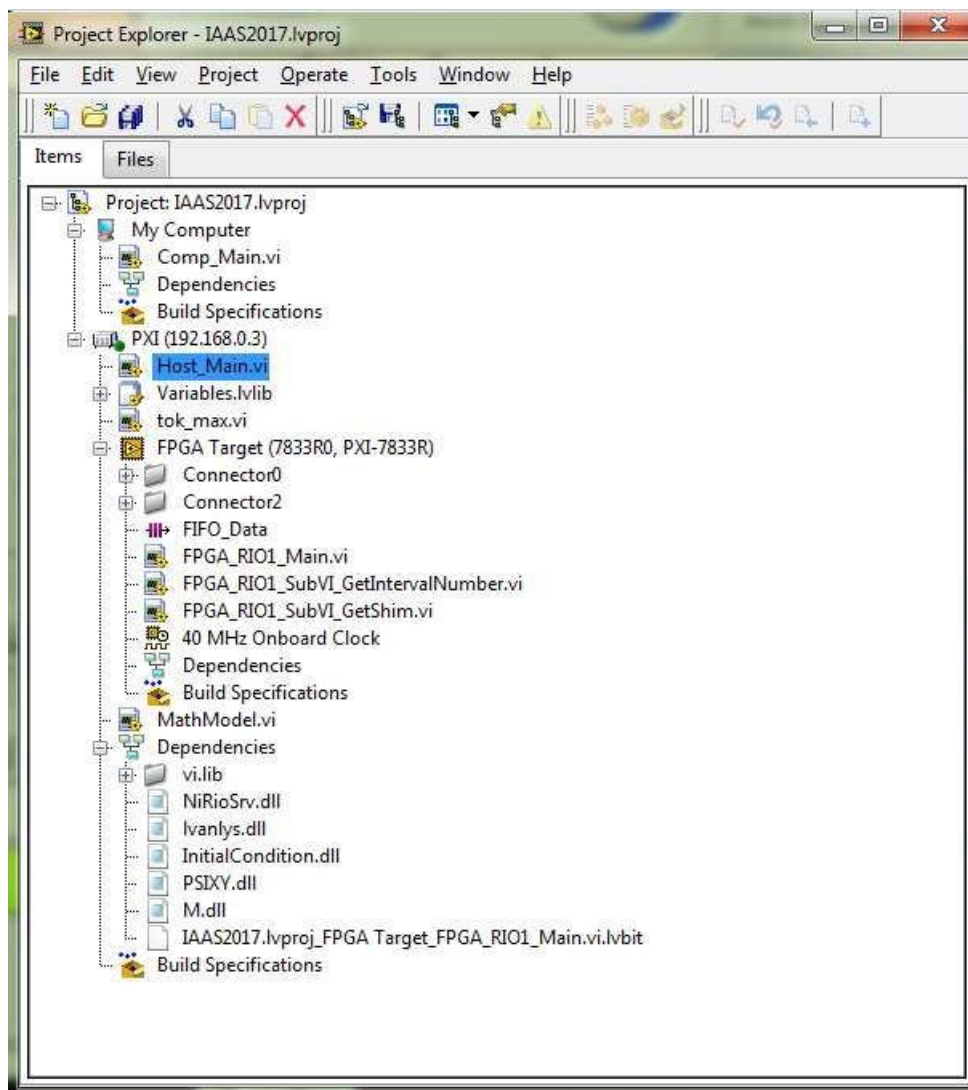


Рисунок 3.2 – Оглядач проекту

Кожен із використаних віртуальних інструментів має власне функціональне призначення та виконує визначене завдання у структурі системи управління. Сукупність усіх модулів формує єдине програмне середовище, у межах якого реалізуються процеси збору, аналізу, обробки та відображення інформації. Взаємодію між окремими компонентами програмного проекту наведено на діаграмі компонентів, представлений на рисунку 3.3.

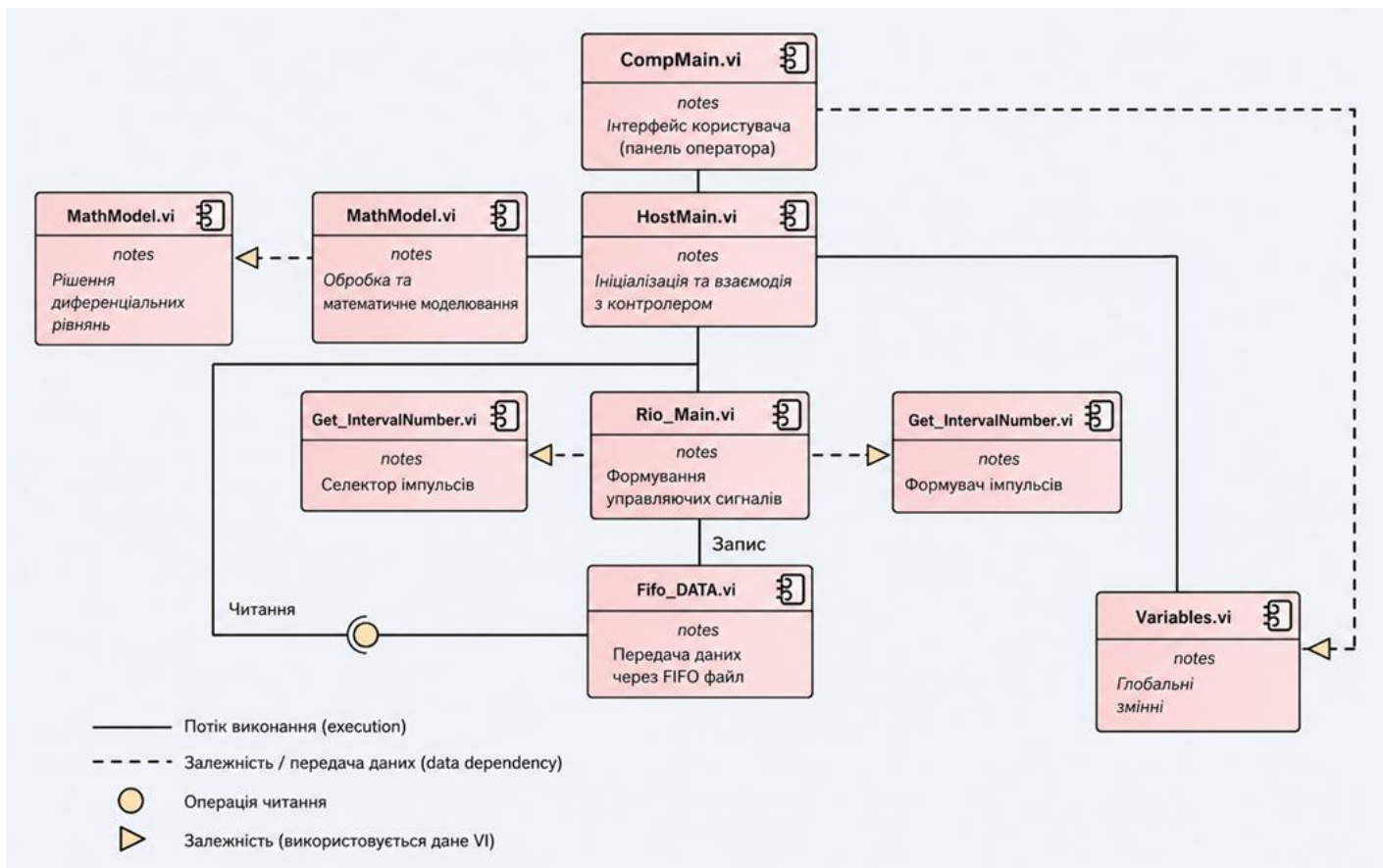


Рисунок 3.3 – Діаграма компонентів

Динамічно підключені бібліотеки, представлені в блоці Dependencies, оглядача рішень, описані мовою «С» і є необхідними для розрахунку математичної моделі. Фізично розташовуються на ПК з встановленим LabVIEW, проте під час запуску виконуваної програми, вони використовуються на рівні контролера в режимі реального часу.

Інтерфейс, з яким взаємодіє користувач, представлений у віртуальному інструменті, розташованому на рівні контролера, Host\_main.vi.

### 3.3 Технічні засоби та рішення для створення віртуальних приладів

Візуалізація та контроль інформації, що надається оператору, здійснюється у віртуальному інструменті Host\_Main.vi

Вихідними даними для роботи програми (Host\_Main.vi) є: задана частота, початкова амплітуда, кількість підінтервалів в інтервалі, фазовий зсув, амплітуда в системі відносних одиниць (від 1 % до 100 %). Дані значення задаються для кожної з двох груп обмоток.

Розрахунок первинних значень

Для кожної з двох груп обмоток відбувається розрахунок наступних параметрів:

- 1) кількість підінтервалів;
- 2) кількість тіків у подінтервалі, що розраховуються за формулою і округлюються шляхом цілочисельного перетворення з змінної temp;
- 3) фактичної частоти. Реалізація фазового зсуву

Кількість інтервалів необхідно представити у вигляді трьох проміжків для реалізації фазового зсуву за алгоритмом, представленим у блоці Formula Node. Блок Formula Node отримує на вхід значення фазового зсуву (Фазовий зсув №1, Фазовий зсув №2) відносно початку відліку, а також параметри для двох із трьох можливих проміжків (перший проміжок рахується від початку відліку). Параметри фазового зсуву записуються в змінні, що передаються до виконання цільової FPGA для першої групи обмоток Shift1\_1...Shift1\_3, відповідно для другої групи обмоток Shift2\_1...Shift2\_3

Формування таблиці ШІМ. На вхід блоку For Loop надходять наступні значення:

- 1) число підінтервалів;
- 2) кількість градусів у підінтервалі позитивної напівхвилі;
- 3) кількість градусів у підінтервалі періоду;
- 4) початкова амплітуда.

Кількістю ітерацій є число підінтервалів. У блоці відбувається розрахунок ширини сигналу ШІМ. Розрахунок проводиться наступним чином:

- 1) поточна кількість градусів у подінтервалі отримується за допомогою множення кількості градусів у подінтервалі періоду на поточну ітерацію;

- 2) відбувається підсумовування поточної кількості градусів в інтервалі з кількістю градусів в подінтервалі позитивної напівхвилі;
- 3) з огляду на особливості блоку Sine виникає необхідність перетворення отриманого раніше кута в радіани для отримання значення синуса;
- 4) Отримане значення множиться на амплітуду, що прийнята в якості вихідних даних.
- 5) Після округлення значення множиться на масштабну величину бажаної амплітуди.

Масив ширини ШІМ в підінтервалах передається для запису в змінну ShimTicks1 і ShimTicks2, попередньо конвертувавши формат в unsigned 32 bit integer для подальшої роботи підпрограм.

Підсумковий запис перерахованих вище змінних ведеться в блоці Read/Write Control для передачі в роботу підпрограми FPGA\_RIO0\_Main.vi. Для передачі даних в роботу блок Read/Write Control повинен отримати посилання на віртуальний інструмент цільового FPGA (FPGA VI Reference In). У даній підпрограмі посилання на цільовий інтерфейс вказується перед початком обчислень.

Для синхронізації FPGA і Host підпрограм існує необхідність внесення синхронізаційної затримки для безпомилкової передачі даних. Для цього в першому фреймі Flat Sequence Structure розміщений компонент Wait.

У другому фреймі Flat Sequence Structure розташоване зчитування змінних, заданих в Host.vi і представлених в таблиці раніше. По завершенню операції зчитування FPGA за допомогою блоку Interrupt формує запит на переривання, конфігурація блоку спрямована на очікування підтвердження обробки переривання від Host\_Main.vi

Також у другому фреймі розміщений цикл While Loop, в якому розташовані блоки селектора і формувача імпульсів, що виконуються відповідно в першому і другому фреймі Flat Sequence Structure.

У першому фреймі розташовується Loop timer, що регулює тривалість виконання операції. Лічильник підінтервалів формує за допомогою блоку Select сигнали, залежно від ітераційного номера і кількості підінтервалів, рівні або 0 у

випадку, якщо True, або сигнали, рівні ітераційному номеру у випадку False, сигнал передається в користувацькі блоки GetIntervalNumber, GetShim.

У другому фреймі розташований формувач імпульсу ШІМ, що подає сигнали відкриття і закриття ключів інверторів, і блоки I/O Node, що приймають сигнали.

У заключному фреймі Flat Sequence Structure, що розташовується на першому рівні, відбувається запис даних за допомогою прямого доступу в пам'ять DMA FIFO.

Отримання і візуалізація даних в Host\_Main з DMA FIFO в FPGA\_RIO1\_Main FIFO\_Data.Read здійснює читання даних в циклі While, елементи записані FPGA\_RIO1\_Main передаються в блок IndexArray, де відбувається індексація необхідних до зчитування елементів, зворотня розгортка Build Array, представленого в FPGA\_RIO1\_Main.

Таким чином, на виході ми маємо значення струму в двох групах обмоток, кут відліку. На основі отриманих значень будуються графіки кута повороту, а значення струму виводяться на екран окремими блоками. Comp\_Main.vi Вивантаження експериментальних даних з контролера, обробка із записом у файл.

Розв'язання диференціальних рівнянь з використанням динамічно підключеної бібліотеки представлено у віртуальному інструменті MathModel.vi.

Математична модель ДПЖ при постійності параметрів напруги живлення другої обмотки представлена системою з трьох диференціальних рівнянь, два рівняння використовуються для розрахунку поточозчеплень в обмотці, третє рівняння використовується для розрахунку обертового моменту.

Для того щоб позбутися повторного перерахунку коефіцієнтів, існує необхідність представлення математичної моделі у вигляді послідовної структури Flat Sequence Structure, яка є базовою функцією ICP LabVIEW, розташованою в палітрі інструментів Programming, Structures. Структура виконується зліва направо, дані передаються в наступний фрейм структури, коли попередній фрейм завершує своє виконання, що означає пряму залежність параметрів одного фрейму від іншого.

Програмна реалізація розрахунку математичної моделі являє собою класичний метод Рунге-Кутти для системи звичайних диференціальних рівнянь і представлена

на рисунку 3.4. Вихід з циклу здійснюється при досягненні встановленої кількості ітерацій.

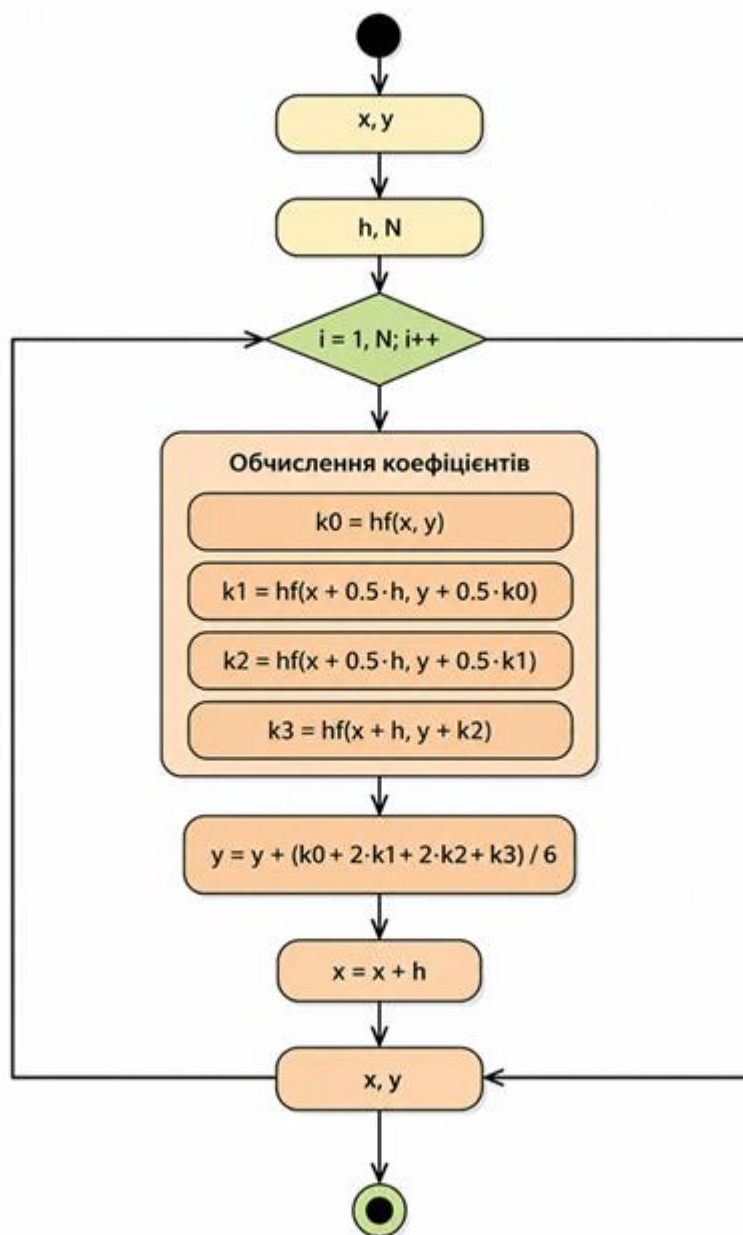


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму розрахунку

До використання пропонується наступна методика для проведення розрахунків в режимі реального часу. Основна сутність методики полягає в створенні динамічно підключаємої бібліотеки певної конфігурації на мові «C/C++» і впровадженні даної бібліотеки в віртуальний інструмент, що використовується в проекті LabVIEW.

Дана методика дозволяє скоротити час, необхідний для створення і налагодження коду, реалізованого в LabVIEW шляхом використання вбудованого вузла Call Library Function Node, що є однією з безлічі базових функцій, що означає наявність можливості використовувати методику без додаткових програмних пакетів, що поставляються виробником.

Програмний код, що розраховується для системи диференціальних рівнянь за методом Рунге-Кутти з четвертим порядком точності, дещо відрізняється від коду, що реалізується в класичних додатках C/C++, використанням ключових слів і методом збірки додатка.

Для коректного створення DLL необхідно задати особливі налаштувань в властивостях конфігурації. Задаються додаткові каталоги включених файлів і бібліотек, в нашому випадку каталог повинен вказувати на labview.lib для прив'язки створюваного програмного коду до ядра LabVIEW. Також необхідно додати бібліотечний файл labview.lib в конфігурацію створюваного проекту. У програмний код слід включити заголовочний файл «windows.h», що визначає велику кількість спеціальних функцій Windows, які можна використовувати в C, а також «extcode.h», який використовується в LabVIEW для роботи з імпортованим кодом.

У випадку використання DLL-бібліотеки спільно з контролером реального часу застосовується спеціалізована утиліта LabVIEW RT DLL Checker, розроблена компанією National Instruments. Дана утиліта використовується для перевірки сумісності бібліотеки із системою реального часу та дозволяє визначити наявність несумісних функцій або компонентів, що можуть перешкоджати коректному виконанню програмного забезпечення. Крім того, утиліта надає інформацію щодо можливості імпорту DLL у конкретну версію програмного забезпечення LabVIEW. Приклад перевірки сумісності динамічної бібліотеки наведено на рисунку 3.5.

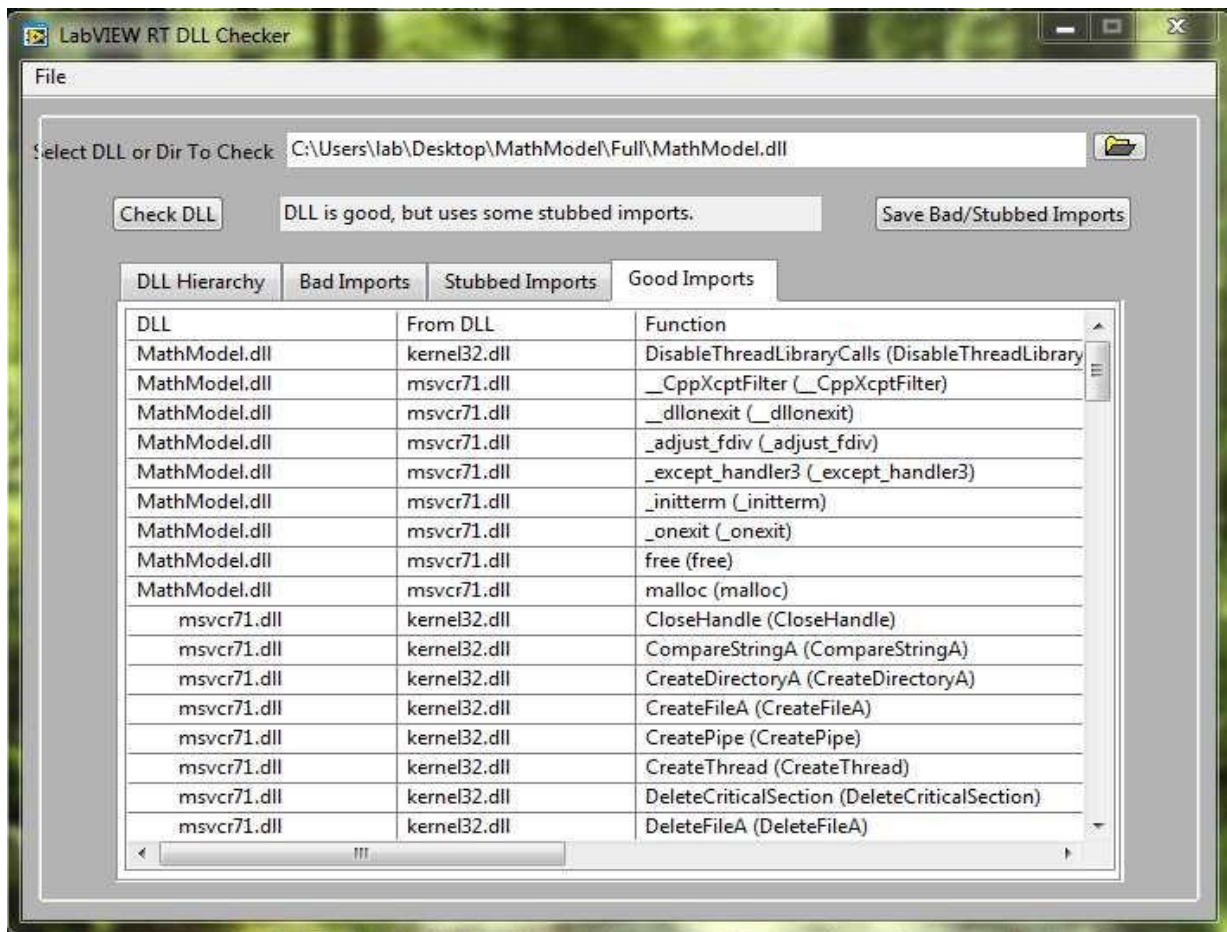


Рисунок 3.5 – Перевірка сумісності DLL

Після успішного проходження перевірки сумісності здійснюється налаштування вузла Call Library Function Node та подальше підключення DLL-бібліотеки до програмного проєкту. У параметрах блоку Function задається ім'я або шлях до підключеної бібліотеки, а також визначається тип угоди про виклики функцій.

Під час інтеграції зовнішнього програмного коду можуть використовуватися дві основні угоди про виклики: cdecl та stdcall (WINAPI). Угода cdecl є стандартною для компіляторів мови C, тоді як stdcall використовується в операційній системі Windows для виклику функцій WinAPI. Правильний вибір типу угоди про виклики є необхідною умовою коректної взаємодії між LabVIEW та DLL-бібліотекою.

У вкладці Parameters здійснюється налаштування параметрів, що передаються до функції. Для кожної змінної задається її назва, тип даних, формат передачі та режим використання покажчиків. Особливу увагу необхідно приділяти правильності

порядку передачі змінних, оскільки він повинен повністю відповідати структурі функції, реалізованої у програмному коді DLL-бібліотеки. Вікно налаштування параметрів функції наведено на рисунку 3.6.

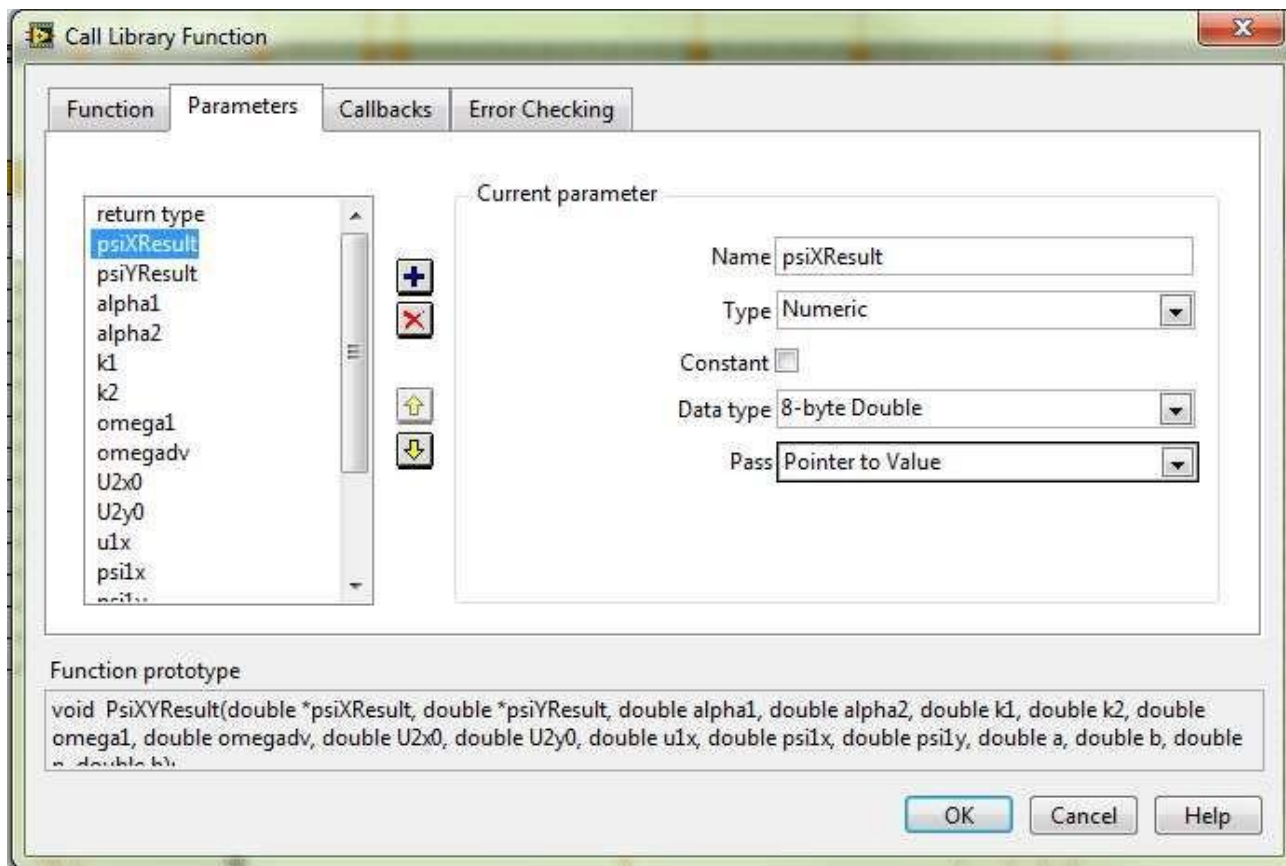


Рисунок 3.6 – Параметри, що передаються у функцію

Віртуальний прилад із реалізованою математичною моделлю побудований у вигляді послідовної структури, що складається з декількох функціональних фреймів. У першому фреймі здійснюється розрахунок вихідних параметрів та визначення необхідних коефіцієнтів моделі. У другому фреймі виконуються обчислення потокозчеплень і електромагнітного моменту. Така організація структури програми забезпечує послідовність виконання математичних операцій та підвищує наочність програмної реалізації моделі. Загальний вигляд віртуального приладу з математичною моделлю представлено на рисунку 3.7.

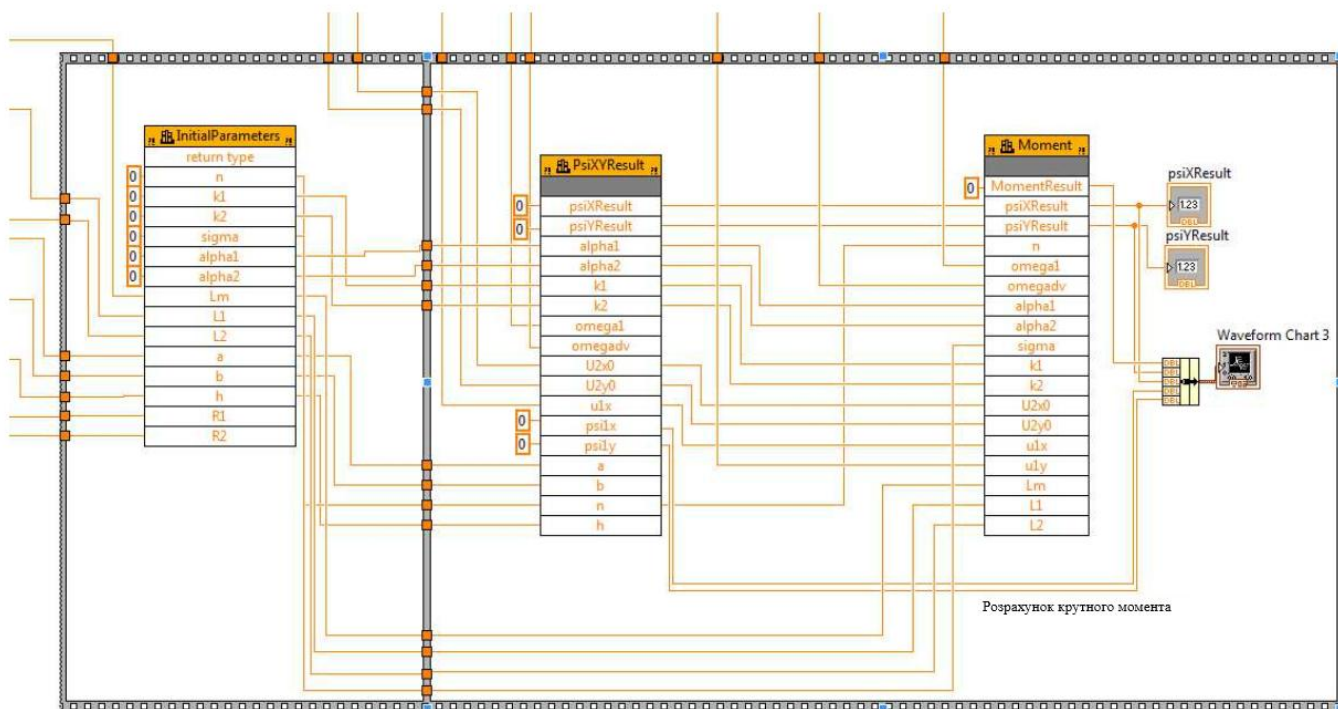


Рисунок 3.7 – Віртуальний прилад з математичною моделлю

Отримані значення виводяться на графік і у вигляді окремих змінних, є можливість для подальшої передачі даних за допомогою DMA FIFO файлу.

Шляхом вимірювання величин в ході розрахунку програми було встановлено, що час, який займає розрахунок диференціальних рівнянь за методом Рунге-Кутти з четвертим порядком точності, становить 10 мілісекунд на 100 ітерацій алгоритму. Дані про обертальний момент далі можуть бути використані для обчислення кутової швидкості і кута повороту електродвигуна, що в перспективі дозволяє позбутися датчика кутового положення.

### 3.4 Модель імітації та результати моделювання

Для перевірки працездатності розробленої системи керування індукторним електроприводом подвійного живлення була створена імітаційна модель, що дозволяє дослідити процеси в електроприводі. Моделювання проводилось у

середовищі LabVIEW з використанням математичної моделі, реалізованої у вигляді динамічно підключаємої бібліотеки DLL.

Основною метою моделювання є:

– перевірка правильності роботи алгоритмів формування ШІМ; – оцінка впливу фазового зсуву між групами обмоток; – аналіз процесів зміни струмів, потокозчеплень та електромагнітного моменту; – дослідження перехідних процесів під час зміни навантаження; – перевірка стабільності роботи системи управління.

Імітаційна модель складається з:

1. Блок формування сигналів керування ШІМ.
2. Блок математичної моделі індукторного двигуна подвійного живлення.
3. Блок моделювання інверторів напруги.
4. Блок розрахунку електромагнітного моменту.
5. Блок моделювання механічного навантаження.
6. Блок збору та візуалізації результатів.

Структура взаємодії блоків імітаційної моделі наведена на рисунку 3.8.

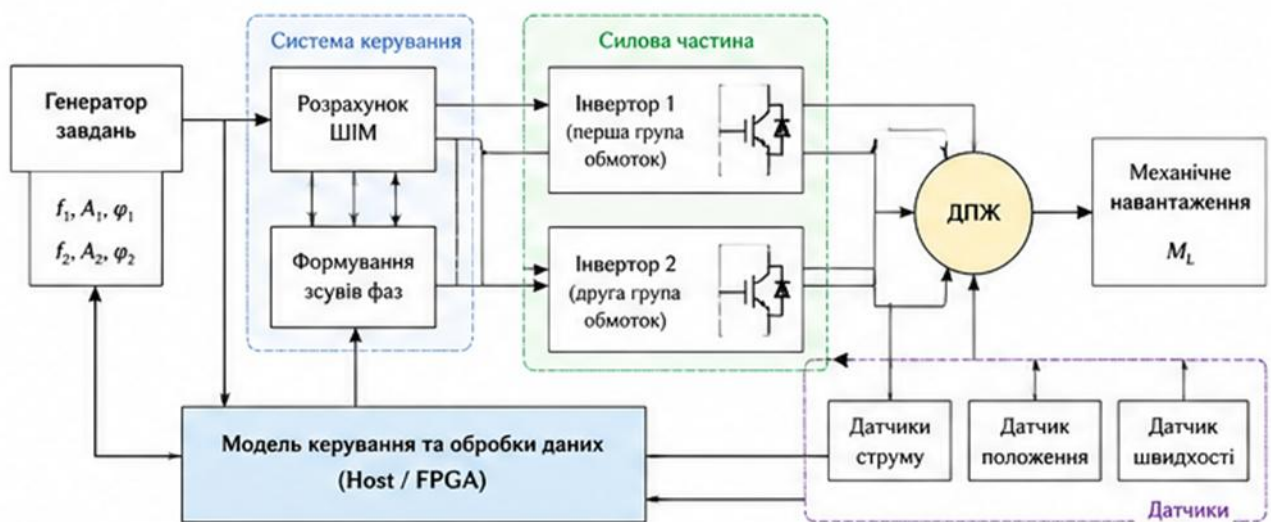


Рисунок 3.8 – Структурна схема імітаційної моделі системи управління електроприводом

В процесі моделювання використовувались параметри електропривода, отримані з технічної документації та експериментальних досліджень. Розрахунок

математичної моделі здійснювався методом Рунге–Кутти четвертого порядку точності.

Для забезпечення адекватності результатів моделювання крок інтегрування був обраний рівним 0,0001 с, що дозволяє враховувати швидкоплинні електромагнітні процеси в обмотках двигуна.

На першому етапі досліджувалась робота алгоритму формування широтно-імпульсної модуляції рисунок 3.9. В процесі моделювання було отримано сигнали керування транзисторними ключами інвертора.

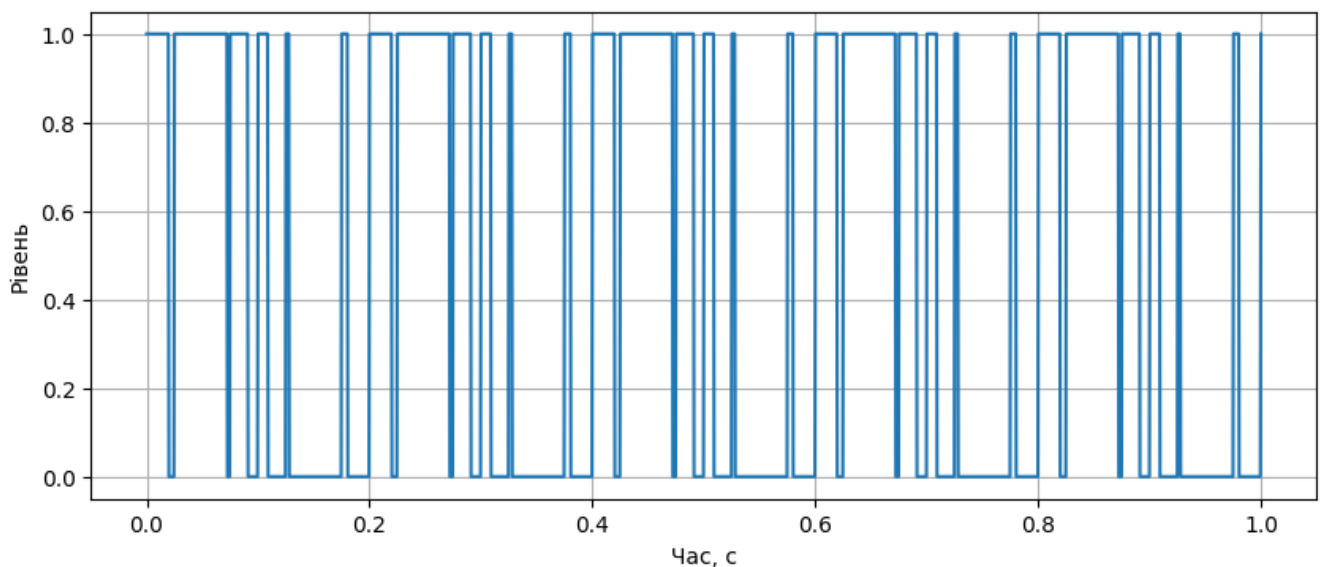


Рисунок 3.9 – Сигнали формування ШІМ для першої групи обмоток

З отриманих графіків видно, що сформовані імпульси мають симетричну структуру відносно центру періоду, що забезпечує зменшення гармонічних складових струму та зниження пульсацій електромагнітного моменту.

Для другої групи обмоток було реалізовано фазовий зсув відносно першої групи. Результати моделювання наведені на рисунку 3.10.

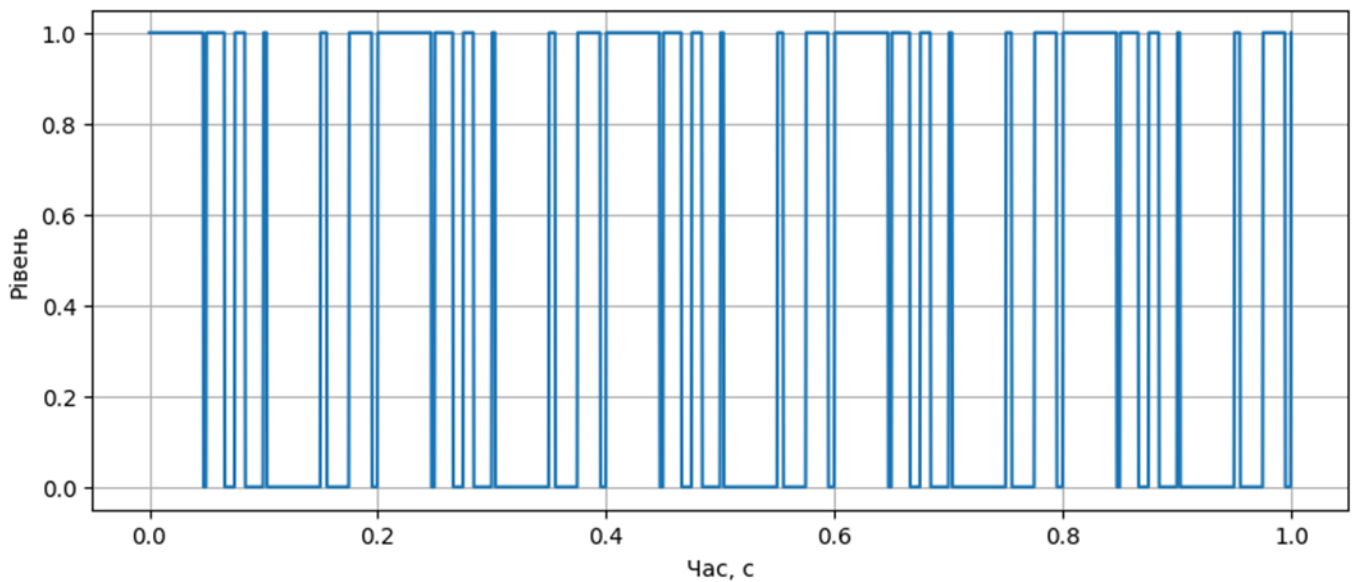


Рисунок 3.10 – ШІМ-сигнали другої групи обмоток із фазовим зсувом

Отримані результати підтверджують правильність реалізації алгоритму фазового зміщення та синхронізації каналів керування.

Одним з основних параметрів, що характеризують роботу електропривода, є струми фазних обмоток. В процесі моделювання було отримано часові залежності струмів для двох груп обмоток рисунок 3.11 та 3.12.

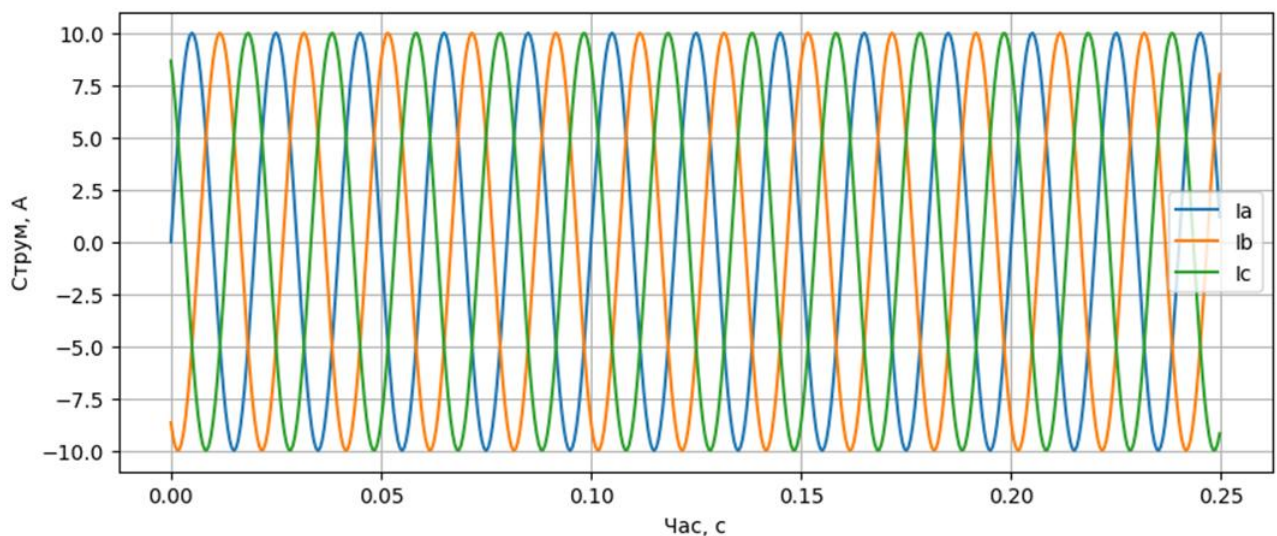


Рисунок 3.11 – Осцилограми фазних струмів першої групи обмоток

Аналіз осцилограм показує, що форма струмів наближена до синусоїдальної. Наявність незначних пульсацій пояснюється використанням широтно-імпульсної модуляції та дискретним характером роботи інвертора.

На рисунку 3.12 наведені результати моделювання струмів другої групи обмоток.

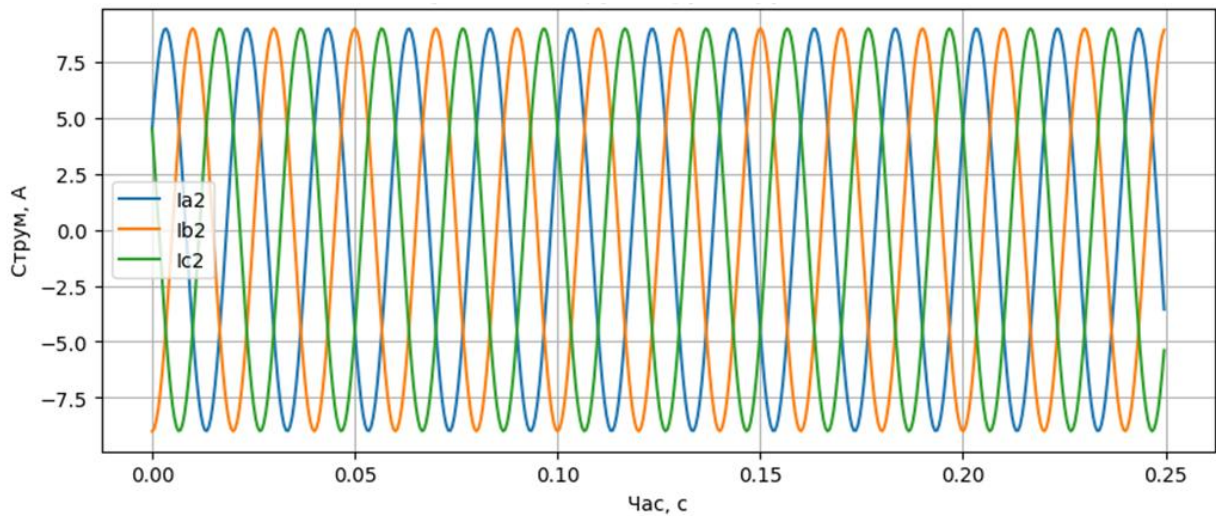


Рисунок 3.12 – Осцилограми фазних струмів другої групи обмоток

Встановлено, що при введенні фазового зсуву між групами обмоток зменшується рівень гармонічних спотворень та покращується рівномірність розподілу навантаження між фазами.

Одним з ключових параметрів роботи електропривода є електромагнітний момент. В процесі моделювання було проведено дослідження зміни моменту при пуску двигуна та зміні навантаження рисунок 3.13.

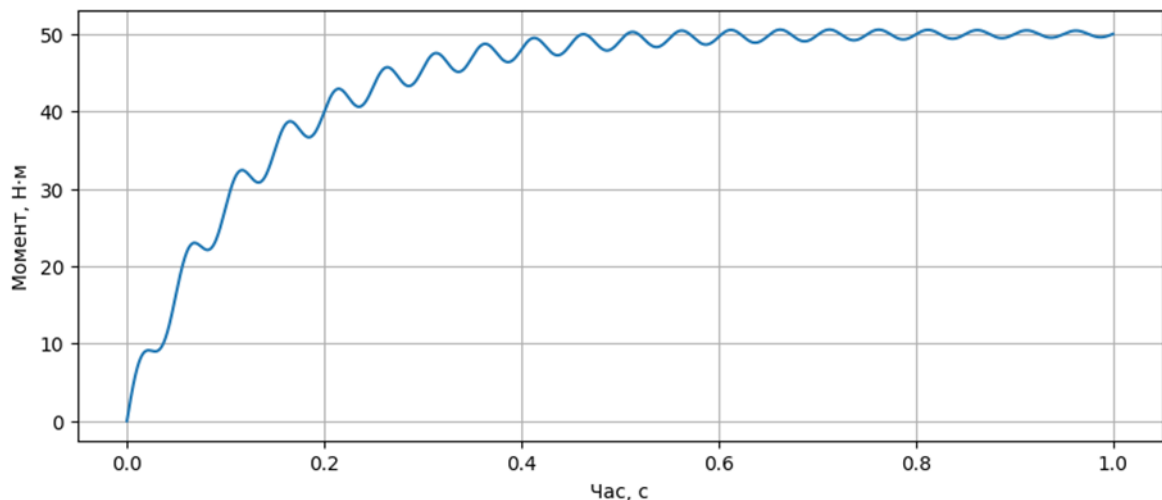


Рисунок 3.13 – Графік зміни електромагнітного моменту під час пуску електропривода

На початковому етапі роботи спостерігається короткочасний перехідний процес, що супроводжується збільшенням моменту. Після завершення перехідного процесу система виходить на усталений режим роботи.

Пульсації моменту не перевищують допустимих значень, що свідчить про ефективність застосованого алгоритму керування.

В процесі моделювання також було досліджено зміну кутової швидкості ротора електродвигуна рисунок 3.14.

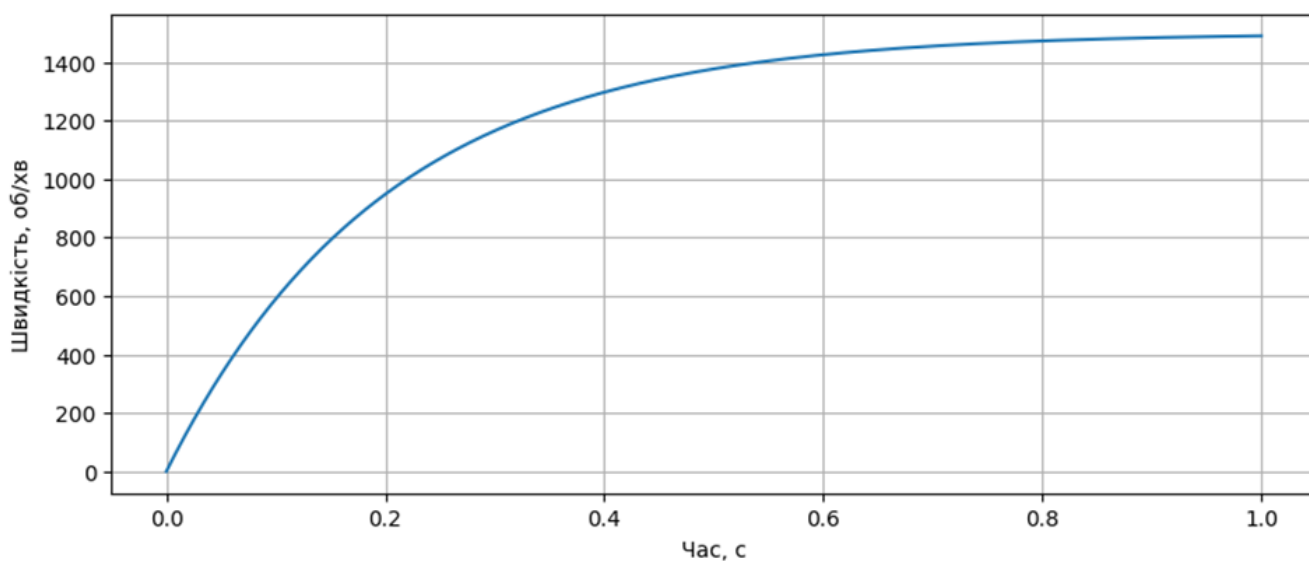


Рисунок 3.14 – Перехідний процес зміни кутової швидкості ротора

З отриманого графіка видно, що система забезпечує плавний розгін електродвигуна без значних коливань швидкості. Час виходу на номінальну швидкість становить приблизно 0,8–1,2 с залежно від величини навантаження.

Після досягнення усталеного режиму відхилення швидкості від заданого значення не перевищує 2–3 %, що свідчить про високу точність системи управління.

Для оцінки стійкості системи було проведено моделювання стрибкоподібної зміни механічного навантаження представленої на рисунку 3.15.

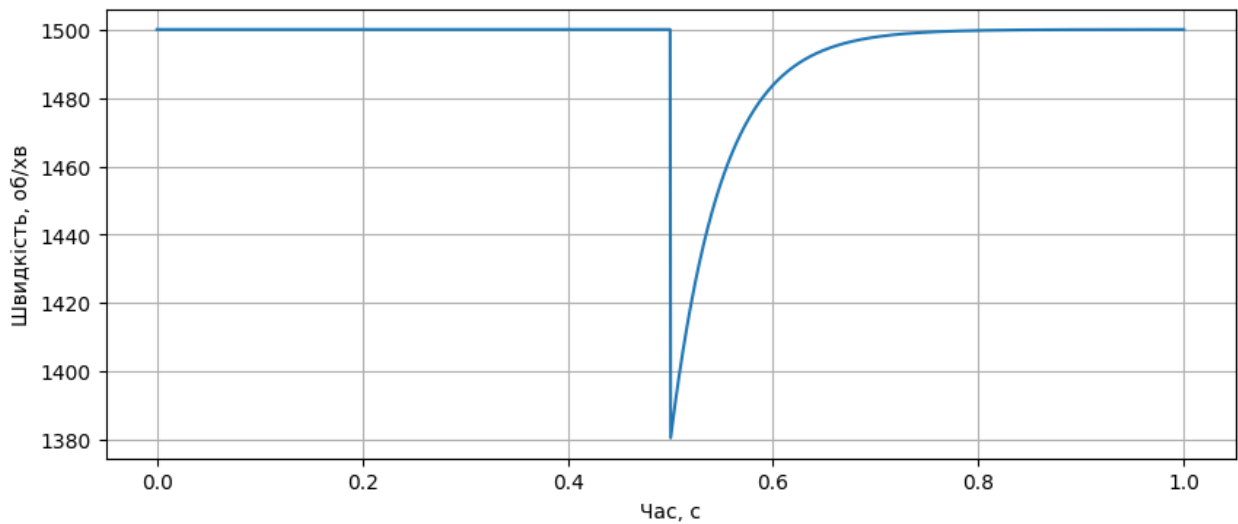


Рисунок 3.15 – Реакція системи на зміну механічного навантаження

В момент прикладення навантаження спостерігається короткочасне зменшення швидкості обертання та збільшення струму статора. Після завершення перехідного процесу система автоматично компенсує зміну навантаження та повертається до усталеного режиму роботи.

Тривалість перехідного процесу не перевищує 0,2–0,3 с, що підтверджує достатню швидкодію системи управління.

### 3.5 Висновки до розділу

У даному розділі було розроблено систему керування індукторним електроприводом подвійного живлення на основі програмно-апаратної платформи National Instruments PXI та середовища графічного програмування LabVIEW. Виконано опис структури програмно-апаратного комплексу, принципів взаємодії між контролером реального часу, FPGA-модулем та програмним забезпеченням системи.

Розглянуто програмну реалізацію алгоритмів формування широтно-імпульсної модуляції, механізм передачі даних між Host- та FPGA-рівнями, а також методику інтеграції динамічно підключених DLL-бібліотек у середовище LabVIEW. Для розрахунку математичної моделі електропривода використано метод Рунге–Кутти

четвертого порядку точності, що дозволило забезпечити достатню точність та швидкодію обчислень у режимі реального часу.

У ході роботи було створено імітаційну модель системи керування, за допомогою якої проведено дослідження процесів формування ШІМ-сигналів, зміни фазних струмів, електромагнітного моменту та кутової швидкості ротора. Результати моделювання підтвердили правильність реалізації алгоритмів керування та ефективність запропонованої системи.

Аналіз отриманих характеристик показав, що система забезпечує стабільну роботу електропривода, плавний пуск, достатню швидкодію та високу точність підтримання заданої швидкості. Встановлено, що застосування фазового зсуву між групами обмоток сприяє зменшенню гармонічних спотворень струму та пульсацій електромагнітного моменту.

Отримані результати підтверджують доцільність використання програмно-апаратних засобів National Instruments та технології FPGA для реалізації сучасних систем керування електроприводами в режимі реального часу.

## 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Електробезпека – це система організаційних і технічних заходів, що забезпечують захист людей від небезпечної і шкідливої дії електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля, статичної електрики. [13]

Основними заходами захисту від ураження електричним струмом є:

- забезпечення недоступності струмопровідних частин для випадкового дотику;
- застосування електроенергії з безпечними величинами напруги;
- усунення небезпеки ураження людей струмом у разі появи напруги на частинах конструкцій електроустаткування;
- застосування індивідуальних захисних засобів від ураження електричним струмом.

Недоступність струмопровідних частин для випадкового дотику досягається ізоляцією їх струмонепровідними матеріалами. Провідники електричного струму повинні мати робочу ізоляцію. Передбачено застосування в деяких випадках додаткової, підсиленої чи лінійної ізоляції.

Недоступність розташування струмопровідних частин досягається розміщенням їх на висоті, під підлогою чи приховано в стінах. Незахищені струмопровідні частини, до яких можливий дотик людей, надійно огорожують у всіх випадках, якщо напруга перевищує:

- 65 В – в приміщеннях без підвищеної небезпеки;
- 42 В – в приміщеннях з підвищеною небезпекою;
- 12 В – в приміщеннях особливо небезпечних.

У випадку напруги понад 250 В огорожують не тільки незахищені, але й ізольовані струмопровідні частини.

Застосування малих напруг – дуже ефективний захист від ураження електричним струмом. Для живлення кіл керування технологічним обладнанням, встановленим в особливо небезпечних приміщеннях і приміщеннях з підвищеною небезпекою; кіл керування пересувного устаткування і для живлення ручного

інструменту використовують напругу не вище 42 В. На шафах і пультах керування обладнанням розміщують штепсельні розетки з напругою не вище 12 В для включення переносних світильників, які використовуються під час періодичних оглядів наявних в них важкодоступних місць.

Захисне заземлення, занулення і відключення – основні заходи захисту людей від ураження електричним струмом у разі появи напруги на частинах конструкцій електроустаткування.

#### **4.1 Підвищення стійкості функціонування організації в надзвичайних ситуаціях**

Стійкість роботи організації в надзвичайних ситуаціях - це її здатність випускати встановлені види продукції в заданих обсягах і номенклатурі, або точно виконувати свої функціональні обов'язки.

Підвищення стійкості роботи починається з організації та проведення дослідження стійкості роботи організації. Головна мета дослідження - виявлення слабких місць у роботі і вироблення комплексу заходів щодо їх усунення.

Дослідження включає три етапи:

- організаційний етап;
- оцінку стійкості роботи організації;
- розробку заходів щодо підвищення стійкості роботи організації.

Оцінка стійкості роботи організації включає в себе оцінку:

- ймовірності виникнення зовнішніх і внутрішніх НС природного, техногенного, воєнного характеру та їх вплив на життєдіяльність організації;
- надійності системи захисту працівників організації від вражаючих факторів НС військового, техногенного та природного характеру;
- фізичної стійкості будівель, споруд, що забезпечують систем;
- стійкості матеріально-технічного постачання і виробничих зв'язків;
- стійкості системи керування, зв'язку та оповіщення;
- підготовленості організації до відновлення порушеної функції.

Заходи щодо підвищення стійкості роботи поділяють на: організаційні, інженерно-технічні та спеціальні.

Організаційні заходи включають в себе:

- прогнозування наслідків можливих надзвичайних ситуацій та розробку планів дій на мирний і воєнний час;
- підготовку керівного складу до роботи у надзвичайних ситуаціях;
- навчання працівників організації дотримання заходів безпеки і способам дій при виникненні надзвичайної ситуації;
- розробку інструкцій щодо зниження небезпеки виникнення аварійних ситуацій в організації, а також по безаварійної зупинки виробництва, локалізації аварій, ліквідації їх наслідків та організації відновлення порушеного виробництва;
- підготовку сил і засобів організації для проведення заходів з ліквідації наслідків аварійних ситуацій і відновлення виробничої діяльності;
- підготовку до проведення евакуації працівників організації, населення, сільськогосподарських тварин з небезпечних зон;
- створення і підтримка в постійній готовності систем оповіщення та керування при надзвичайних ситуаціях та ін.

Інженерно-технічні заходи спрямовані на підвищення фізичної стійкості будівель, споруд, технологічного обладнання, інженерних комунікацій, а також на створення умов для швидкого проведення відновлювальних робіт, підвищення захищеності працівників, сільськогосподарських тварин, рослин і продуктів сільськогосподарського виробництва.

Спеціальні заходи спрямовані на створення умов для переведення роботи організації на аварійний режим і на забезпечення захисту працівників у надзвичайних ситуаціях і на швидку ліквідацію наслідків цих ситуацій.

## **4.2 Заходи з електробезпеки**

До технічних засобів і заходів захисту від ураження електричним струмом належать:

- застосування малих напруг;
- ізоляція струмоведучих частин (робоча, додаткова, посилена, подвійна);
- забезпечення недосяжності неізольованих струмоведучих частин;
- захисне заземлення;
- занулення, захисне відключення;
- вирівнювання потенціалів;
- електричне розділення мереж;
- компенсація струмів замикання на землю;
- огорожувальні улаштування;
- попереджуюча сигналізація;
- блокування; знаки безпеки;
- засоби захисту і запобіжні пристосування та ін.

Мала напруга – це номінальна напруга, яка не перевищує 42 В і застосовується для зменшення небезпеки ураження електричним струмом. Нормативними документами передбачається у виробничих умовах застосовувати два значення малих напруг – 12 В і 42 В. У приміщеннях з підвищеною небезпекою і особливо небезпечних напруга для світильників місцевого, ремонтного освітлення і ручного інструменту не повинна перевищувати 42 В. Крім того, в особливо небезпечних приміщеннях, за несприятливих умов (наприклад, робота сидячи або лежачи на струмопровідній підлозі) для живлення ручних переносних ламп потрібна ще більш низька напруга –12 В.

#### **4.3 Заходи протипожежної безпеки**

В приміщеннях встановити наступний протипожежний режим, яким передбачено:

- порядок паління цигарок. Паління в будинках і приміщеннях заборонено. Для паління на територіях об'єктів обладнані спеціальні місця, які позначені знаками пожежної безпеки або написами - "Місце для паління" та об лаштовані урнами для недопалків. На території об'єктів заборонено застосування відкритого

вогню (розігрівання замерзлих труб опалення, спалювання відходів виробництва, сміття, сухого листя, тощо);

- порядок користування електронагрівальними приладами. Приготування кип'ятку, розігрівання та приготування їжі здійснюється в спеціально обладнаних для цих цілей місцях із застосуванням електрочайників з автоматичними пристроями відключення електронагрівальних елементів;

- порядок роботи з електроприладами. Забороняється залишати без нагляду увімкнені в електромережу електроприлади та оргтехніку - персональні ЕОМ, оргтехніку, радіоприймачі, електронагрівальні прилади, вентилятори, кондиціонери;

- порядок виконання вогнебезпечних робіт. Проведення вогневих та інших пожеже небезпечних робіт (газоелектрозварювальних, газорізальних, розігрів бітумів та смоли) дозволяється проводити після підготовки місця проведення цих робіт, узгодження з інженером з пожежної безпеки та виконання усіх передбачених заходів з пожежної безпеки; перевірка робочих місць та приміщень у кінці робочого дня. Перед закінченням роботи та закриттям приміщень особа, відповідальна за протипожежний стан приміщення, (працівник) зобов'язана перевірити протипожежний стан приміщень, відключити напругу з усіх електроустановок та електроприладів (вимірювальних, електронно-обчислювальних, паяльників, кондиціонерів, вентиляторів, радіоприймачів, комп'ютерів тощо), а також з мереж їх живлення. Закрити вікна, квартирки. Виявлені порушення правил пожежної безпеки необхідно усунути до закриття приміщень.

Заходи пожежної безпеки в процесі роботи:

Дії персоналу в разі загрози винищення пожежі чи аварії. Правила вимкнення установок та агрегатів, порядок зняття напруги з електроустановок, виклику аварійної допомоги тощо.

Заходи пожежної безпеки, яких необхідно дотримуватися, приступаючи до роботи, у процесі роботи та після її закінчення з метою запобігання виникненню пожежі.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра проведено аналіз сучасних електроприводів, їх структури, принципів функціонування та основних напрямів розвитку. Встановлено, що застосування цифрових систем керування, силових напівпровідникових перетворювачів і FPGA-технологій дозволяє значно підвищити точність регулювання, швидкодію, енергоефективність та надійність електроприводних систем.

Розроблено структурну схему системи керування індукторним електроприводом подвійного живлення з фазозалежним керуванням. Запропонована структура включає два автономні інвертори напруги, систему формування керуючих сигналів, датчики зворотного зв'язку, модулі збору даних та засоби цифрової обробки інформації. Така організація системи забезпечує ефективне керування електроприводом та можливість реалізації складних режимів роботи.

Побудовано математичну модель двигуна подвійного живлення у власній та єдиній системах обертових координат для дослідження електромеханічних процесів. Отримані математичні залежності дозволяють описувати взаємозв'язок між струмами, потокозчепленнями, напругами та електромагнітним моментом двигуна. Також сформовано спрощену нелінійну модель, яка забезпечує достатню точність розрахунків при зменшенні обчислювальної складності.

Розроблено програмне забезпечення системи керування у середовищі LabVIEW, реалізовано алгоритми формування широтно-імпульсної модуляції, передачі даних між Host- та FPGA-рівнями, а також інтеграцію динамічно підключених DLL-бібліотек для виконання математичних розрахунків.

Створено імітаційну модель системи керування та проведено моделювання основних режимів роботи електропривода. Результати досліджень підтвердили правильність реалізації алгоритмів формування ШІМ-сигналів, ефективність фазового зсуву між групами обмоток, стабільність процесів регулювання струмів, електромагнітного моменту та кутової швидкості ротора. Встановлено, що система забезпечує плавний пуск двигуна, стійку роботу при зміні навантаження та високу точність підтримання заданих параметрів.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Hughes, A., & Drury, B. (2019). *Electric Motors and Drives*. Newnes.
2. Videt, A., Messaoudi, M., Idir, N., Boulharts, H., & Vang, H. (2015). PWM strategy for common-mode voltage reduction in three-phase variable-speed drives with active front end. In *2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC)* (pp. 1–7). IEEE.
3. Khrebtova, O., Zachepa, I., Zachepa, N., & Khrebtova, A. (2022). The control system of the electric drive mechanism for lifting the shutter of a drainage dam using fuzzy logic. In *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (pp. 1–6). IEEE.
4. Буняк О. А. Електричні машини : Навчальний посібник /. — Тернопіль : ФОП Паляниця В.А. , 2023 — 324 с.
5. Pillai, S., Chaudhuri, S., Matani, S., Gupta, A., Gupta, S., & Hatua, K. (2020). Parameter estimation in sensorless vector controlled induction motor drives. In *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)* (pp. 1–6). IEEE.
6. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М.Куценко, В.Ф.Яковлев та ін.—К.: Аграрна освіта, 2013. —449 с..
7. АНДРІЙЧУК, В., НАКОНЕЧНИЙ, М., ФІЛЮК, Я., КОСТИК, Л., & КОЗАК, І. (2023). Електропривід рухомої опромінювальної установки. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 329(6), 44-48.
8. Chen, D., & Chen, Y. (2012). Step-up AC voltage regulators with high-frequency link. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(1), 390–397.
9. Sumner, M., & Asher, G.M. (1993). The development of a complete self-commissioning, self-tuning vector controlled drive. In *IEE Colloquium on Developments in Real-Time Control for Induction Motor Drives*.

10. Zhang, J., Li, H., Li, Z., & Zhang, Z. (2022). Predictive Power Factor Control of Induction Motor Drives. In 2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (pp. 106–111). IEEE.
11. Carlet, P.G., Favato, A., Bolognani, S., & Dörfler, F. (2022). Data-driven continuous-set predictive current control for synchronous motor drives. IEEE Transactions on Power Electronics, 37(6),.
12. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.
13. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший ( бакалаврський ) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.