

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Другий (магістерський)

Освітній рівень

Метод керування безконтактним електроприводом промислового робота

Назва теми

КвРАКІТ.2022166.01.04 ПЗ

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Шифр, назва

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Назва

Виконав:

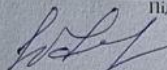
студент II курсу, група АКІТм-22-1


Підпис

Павло ІОНОВ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник


Підпис, дата

Юрій ФОРКУН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер


Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
зав. кафедри автоматизації,
комп'ютерно-інтегрованих
технологій та робототехніки


Підпис, дата

Валерій МАРТИНІОК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

«21» грудня 2023 р.

Хмельницький 2023

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Освітній рівень другий (магістерський)

Галузь знань 15 - Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології

Освітньо-професійна програма Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою АКТР Р.Р.

Мартинюк В. В.

"14" "12" 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІНУ РОБОТУ**

Іонову Павлу Вадимовичу

1. Тема роботи Метод керування безконтактним електроприводом промислового робота

Керівник роботи Форкун Юрій Вікторович, к.т.н., доцент

Затверджено наказом ректора університету від «15» 08 2023р. № 30

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 01.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи моделювання системи керування швидкістю безконтактного приводу на основі PLC, для виконання необхідних аналітичних досліджень роботи системи в якості цифрового двійника.

Об'єкт дослідження - процеси в безконтактному приводі в автоматизованій системі керування промисловим роботом.





Предмет дослідження методи та алгоритми керування швидкістю безконтактного приводу для промислового робота на основі PLC.

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

Вступ. Проблематика розробки мікроконтролерної системи керування безконтактним електроприводом промислового робота. Моделювання автоматичної системи керування швидкістю безконтактного приводу. Розробка методу керування безконтактним приводом промислового робота. Дослідження системи керування швидкістю обертання електроприводу промислового робота. Висновки.

Завдання отримав

Науковий керівник

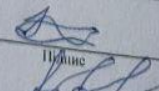
| Консультанти розділів кваліфікаційної роботи | | Підпис, дата | |
|--|---|---|---|
| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Завдання видав | Завдання прийняв |
| Нормоконтроль | Людмила КОРЕЦЬКА к.т.н., доцент |  |  |
| Антиплагіат | Микола ФЕДУЛА к.т.н., доцент |  |  |

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи | Примітка |
|-------|---|---|----------|
| 1 | Вступ | 20.09.2023р. | виконано |
| 2 | Проблематика розробки мікроконтролерної системи керування безконтактним електроприводом промислового робота | 15.10.2023р. | виконано |
| 3 | Моделювання автоматичної системи керування швидкістю безконтактного приводу | 30.10.2023р. | виконано |
| 4 | Розробка методу керування безконтактним приводом промислового робота | 15.11.2023р. | виконано |
| 5 | Дослідження системи керування швидкістю обертання електроприводу промислового робота | 25.11.2023р. | виконано |
| 6 | Висновки | | |
| 7 | Оформлення пояснювальної записки до КРМ | 30.11.2023р. 01.12.2023р. | виконано |
| 8 | Оформлення презентаційних матеріалів | 01.12.2023р. | виконано |

Студент

Керівник роботи


Підпис

Іонов П.В.
Прізвище, ініціали

Форкун Ю.В.
Прізвище, ініціали

ВСТУП
1 ПРОБЛ
КЕРУВАНН
ПРОМИСЛ
1.1 О
промисло
1.2 В
1.3 К
1.4 К
1.5
швидкістю
1.6 В
2 МОД
ШВИДКІС
2.1 У
з використ
2.2 М
2.3 С
2.4 Б
3 РОЗР
ПРОМИС
3.1
приводу
3.2
3.3
приводом
3.4

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Метод керування безконтактним електроприводом промислового робота»

Автор роботи: Іонов Павло Вадимович

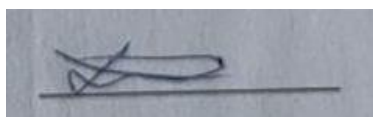
Керівник роботи: Форкун Юрій Вікторович

Пояснювальна записка: 80 стор., 30 рис., 3 дод., 49 джерел.

Графічна частина: 16 презентаційних слайдів.

ЕЛЕКТРОПРИВІД, ПРОМИСЛОВИЙ РОБОТ, БЕЗКОНТАКТНИЙ ПРИВІД, ПЛК, АВТОМАТИЗАЦІЯ, СИЛОВА ЧАСТИНА, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, SIMULINK MATLAB.

Мета роботи: моделювання системи керування швидкістю безконтактного приводу на основі ПЛК, для виконання необхідних аналітичних досліджень роботи системи в якості цифрового двійника. Розглянуто систему керування швидкістю безконтактного електропривода розроблену на основі PLC. Здійснено вибір та розрахунок вентильного електродвигуна. Виконано перевірку отриманих результатів розрахунків за допомогою моделювання у програмному середовищі Simulink MATLAB. Здійснено вибір ПЛК. Виконано моделювання системи керування швидкістю зі схемою векторного керування електродвигуном та досліджено характеристики.



Підпис студента

15.12.2023

Дата

Зміст

| | с. |
|---|----|
| ВСТУП | 4 |
| 1 ПРОБЛЕМАТИКА РОЗРОБКИ МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БЕЗКОНТАКТНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА | 8 |
| 1.1 Огляд та аналіз існуючих технічних рішень приводних систем промислових роботів | 9 |
| 1.2 Відомі принципи керування ПР | 13 |
| 1.3 Класифікація систем керування рухом інструмента | 16 |
| 1.4 Керування ПР на основі PLC | 17 |
| 1.5 Постановка завдань для автоматизації системи керування швидкістю безконтактного електроприводу | 21 |
| 1.6 Висновки до першого розділу | 22 |
| 2 МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ БЕЗКОНТАКТНОГО ПРИВОДУ | 23 |
| 2.1 Узагальнена функціональна схема системи керування швидкістю з використанням вентильного електродвигуна | 23 |
| 2.2 Моделювання роботи вентильного електродвигуна | 27 |
| 2.3 Обробка отриманих результатів моделювання системи керування | 32 |
| 2.4 Висновки до другого розділу | 38 |
| 3 РОЗРОБКА МЕТОДУ КЕРУВАННЯ БЕЗКОНТАКТНИМ ПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА | 39 |
| 3.1 Підбір двигуна для системи керування швидкістю безконтактного приводу | 39 |
| 3.2 Підбір апаратної частини | 47 |
| 3.3 Розробка алгоритмів керування безконтактним моментним приводом | 56 |
| 3.4 Висновки до третього розділу | 60 |

| | |
|---|----|
| 4 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА | 61 |
| 4.1 Особливості вибору елементів керування силової частини електроприводом ПР | 62 |
| 4.2 Аналітичні дослідження елементів керування силової частини електроприводом ПР | 64 |
| 4.3 Висновки до четвертого розділу | 72 |
| ВИСНОВКИ | 73 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 75 |
| ДОДАТКИ | 80 |

ВСТУП

ПР - багатofункціональні механічні пристосування, що складаються із механічної руки та програмованої системи керування, які використовуються для переміщення різних об'єктів - деталей, інструментів, матеріалів або спеціалізованих пристроїв, шляхом використання різноманітних запрограмованих рухів у різних технологічних процесах (ТП).

ПР можуть замінити людину-робітника там, де потрібна важка фізична праця, в умовах підвищеної вологості чи температури, шуму, вібрації, радіоактивності, забруднення повітря та вибухонебезпечності. Такі ПР є перепрограмованими автоматичними машинами з можливістю виконувати рухові функції, подібні до людських, для рухомих об'єктів або технологічного оснащення [1-6].

Система ПР містить у собі будь-які пристрої та/або давачі, необхідні для виконання ПР поставлених задач, а також упорядкування та моніторингу інтерфейсів зв'язку.

ПР, як правило, використовують для виконання небезпечних, неприємних чи частоповторюваних задач. Вони володіють багатьма різними функціями, такими як вантажно-розвантажувальні роботи, завантаження та вивантаження верстатів, дугове зварювання, монтаж, зварювання тертям, розпилення або фарбування.

ПР можуть замінити монотонну фізичну працю, поліпшити якість готових виробів та збільшити виробництво. Один ПР може замінити роботу приблизно три-чотирьох людей-працівників.

Більшість ПР налаштовані на виконання операцій за методом навчання-і-повтору. У цьому режимі навчена людина-оператор (програміст), як правило, використовує портативний пристрій керування (наприклад, підвісний пульт), щоб навчити ПР його завдання вручну. Швидкості ПР під час даних сесій програмування низькі.

Оскільки все більше фірм та виробництв відкривають для себе переваги роботизованого оброблення матеріалів, є необхідність прийняти рішення про те, як краще керувати ПР при виконанні ТП. У той час, як усі оригінальні фірми-виробники обладнання для ПР пропонують використовувати свій власний тісно-інтегрований контролер, нещодавні розробки дозволили контроль ТП на основі PLC. Для об'єктів керування, де вже використовуються контроль на основі PLC у програмах керування іншим машинним обладнанням, переваги використання такого контролю і для ПР може бути більш мудрим вибором, ніж стандартного контролера [1-6].

Метою роботи є моделювання системи керування швидкістю безконтактного приводу на основі PLC, для виконання необхідних аналітичних досліджень роботи системи в якості цифрового двійника.

Для досягнення даної мети роботи необхідно вирішити наступні **завдання**:

- розглянути СК швидкістю безконтактного електропривода розроблену на основі PLC;
- здійснити вибір та розрахунок вентильного електродвигуна;
- виконати моделювання СК швидкістю зі схемою векторного керування електродвигуном та дослідити характеристики;
- здійснити вибір PLC для спроектованої СК;
- виконати перевірку отриманих результатів розрахунків за допомогою моделювання у програмному середовищі Simulink MATLAB.

Об'єктом дослідження є процеси в безконтактному приводі в автоматизованій системі керування промисловим роботом.

Предметом дослідження є методи та алгоритми керування швидкістю безконтактного приводу для промислового робота на основі PLC.

Методи досліджень.

Використовувались основні положення загальної теорії систем, системного аналізу (ієрархічності, декомпозиції та ін.), теорії моделювання процесів. Внаслідок проведення моделювання процесу та розроблення методу керування

безконтактним приводом для ПР використано методи концептуального моделювання, теоретико-множинні підходи, алгебру систем, апарат модельно-орієнтованих підходів, евристичні оцінки, принципи побудови баз знань та формування логічного висновку.

Наукова новизна отриманих результатів: розроблено модель автоматичної системи керування безконтактним приводом для промислового роботу в режимі реального часу.

Практична значимість отриманих результатів: розроблені програмно-технічні засоби для керування безконтактним приводом промислового робота.

Апробація результатів дослідження: опубліковано повнотекстову статтю у фаховому виданні Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» Випуск №3, 2023 рік.

Дипломна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу, висновків, списку використаних джерел, трьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 80 сторінок комп'ютерного тексту, у тому числі: 30 рисунків, список використаних джерел вміщує 49 найменувань.

У вступі виконано опис актуальності обраної задачі, сформульовано завдання для досліджень та мету всієї роботи, представлено основні наукові результати та їх практичну цінність.

У першому розділі магістерської кваліфікаційної роботи представлено аналітичний огляд та аналіз існуючих технічних рішень приводних систем промислових роботів, наведено пояснення основних принципів приводних систем. Розглянуто існуючу класифікацію систем керування рухом інструмента промислового роботу.

Виконано постановку завдань для автоматизації системи керування швидкістю безконтактного електроприводу ПР.

У другому розділі магістерської кваліфікаційної роботи виконано моделювання СК швидкістю ВД та проведено аналітичні розрахунки.

У третьому розділі кваліфікаційної роботи магістра було виконано підбір

необхідного електроприводу типу БМЕ серії 150-4-0,6-2 за базовою схемою керування з пусковим моментом на рівні $16,3 N^*m$.

У четвертому розділі магістерської кваліфікаційної роботи виконано вибір інтелектуального реле типу Zelio Logic SR2B121BD, при цьому ми керувались наступними критеріями: функціональністю, наявністю технічної підтримки, знання користувача, ціною та характеристиками БМЕ, для реалізації спроектованої СК швидкістю обертання. Також було розроблено функціональну схему СК швидкістю БМП на основі PLC.

У висновках по магістерській кваліфікаційній роботі наведено отримані результати роботи «Метод керування безконтактним електроприводом промислового робота».

1 ПРОБЛЕМАТИКА РОЗРОБКИ МІКРОКОНТРОЛЕРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БЕЗКОНТАКТНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

Тенденція розширення існуючого парку промислових роботів (ПР) на сучасному етапі розвитку виробництва викликана цілою низкою об'єктивних чинників. За звичай, це підвищення загальної продуктивності при збереженні високої якості продукції та здатність швидко реагувати на зміни виробничих об'єктів та ринку споживання [1-8, 50].

Серйозними стимулами інвестування у автоматизацію виробництва та використання ПР є наступні:

- відсутність достатньої кількості кваліфікованої робочої сили - людей;
- безперервне зниження витрат на використання ПР на тлі постійного зростання витрат на оплату праці людей;
- звільнення людей-працівників від монотонної, важкої та інтенсивної роботи на виробництві;
- можливість часткового покращення екологічної ситуації та скорочення шкідливого впливу виробництва на здоров'я людей-працівників, наприклад від технологічного процесу (ТП) зварювання;
- підвищення загальної точності виконання технічних операцій (ТО) і, як наслідок, підвищення кінцевої якості продукту;
- можливість використання встановленого технологічного обладнання в три зміни 24/7, 365 днів на рік [50].

Перехід до роботизованого контролю, що заснований на використанні програмованих логічних контролерів (PLC) надає наступні переваги:

- загальні програмні інтерфейси;
- загальна програмна документація;
- загальна методологія програмного резервного копіювання/відновлення;
- загальні елементи керування програмування (програмне забезпечення

(ПЗ), кабелі тощо) [50].

1.1 Огляд та аналіз існуючих технічних рішень приводних систем промислових роботів

Електропривод - електромеханічна система для керування виконавчими механізмами (ВМ) робочих машин та, відповідно, керування рухом для реалізації ТП [9-13].

Сучасний електропривод - це набір із електричних машин, апаратури та систем керування. Він є основним споживачем електричної енергії (60%) і основним джерелом механічної енергії в промисловості [10].

Приводи класифікують на наступні типи:

- нерегульовані, або найпростіші, що призначені для запуску та зупинки роботи електродвигуна в режимі одиночної швидкості;
- регульовані, призначені для керування пуском чи гальмуванням електродвигуна та керування швидкістю для заданого ТП;
- автоматизовані;
- неавтоматизовані.

Автоматизований електропривод (АЕП) на сучасному етапі досить широко застосовується у всіх сферах - від промислового виробництва до повсякденного життя.

Сучасний АЕП [13] містить автоматичну систему керування у структурі, яка в найпростіших випадках забезпечує запуск/вимкнення електродвигуна та захист приводу в цілому, а в більш складних випадках - контролювати ТП приводного механізму.

Контроль швидкості - вимушена зміна швидкості в АЕП в залежності від вимог ТП. Регулювання кутової швидкості обертання електродвигуна, наприклад, постійного струму може бути досягнуто декількома способами:

- регулювання кутової швидкості шляхом зміни магнітного потоку - досить

широко застосовується в електроприводі через простоту реалізації та економічної ефективності, оскільки регулювання є схемою збудження електродвигуна із відносно низьким енергоспоживанням та в свою чергу не супроводжується великою втратою потужності;

- регулювання кутової швидкості шляхом зміни опору в ланцюзі якоря - даний метод використовується за низьких вимог до показників для контролю швидкості, вирізняючись, водночас, простотою реалізації та універсальністю;

- регулювання кутової швидкості шляхом регулювання імпульсу - електродвигун із імпульсним переривником періодично забезпечується імпульсами напруги певної частоти;

- регулювання кутової швидкості шляхом зміни напруги якоря – в даному випадку зміна швидкості обертання виникає в бік зменшення від базової швидкості, тому що напруга, прикладена до якоря в більшості випадків, також може бути змінена, тільки вниз від номінальної. Плавність регулювання визначається плавністю зміни напруги живлення [9-13].

ПР при роботі вимагатиме приводну систему (ПС) для переміщення рук, зап'ястя, та всього тіла. ПС, як правило, використовується для визначення потужності ПР та для приведення в дію суглобів ПР, існують три різні типи доступних ПС:

- гідравлічна;
- пневматична;
- електрична.

Найбільш поширені та використовувані два типи ПС - електричні та гідравлічні.

1.1 Гідравлічна ПС

Гідравлічні ПС повністю призначені тільки для великогабаритних ПР. Вона може забезпечити вищу потужність або швидкість, ніж електрична ПС. Дана ПС може бути використана як для лінійних, так і для суглобів, що

обертаються. Обертові рухи забезпечуються приводами обертання лопатей, у той час як лінійні рухи здійснюються за допомогою використання гідравлічних поршнів. Витік гідравлічних мастил позиціонується як основний недолік даної ПС. Прикладом системи гідроприводу є, наприклад робот Unimate серії 2000 (рис. 1.1) [14-15].



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд ПР Unimate серії 2000 виробництва Kawasaki

1.2 Пневматична ПС

Пневматичні ПС використовуються насамперед в конструкціях маленьких ПР, які володіють менше як 5 ступенями свободи (рис. 1.2). Привід має можливість надавати високу точність та швидкість. Дана ПС може виконувати обертові рухи шляхом приведення в дію спеціальних приводів для обертання. Поступальні рухи ковзання суглобів також можуть бути виконані за допомогою приведення в дію поршня. Вартість даної ПС нижча якщо порівнювати із гідравлічним ПС. Недоліком даної ПС є те, що вона не буде ідеальним вибором для виконання більш швидких ТО [16].

1.3 Електрична ПС

Електропривод має здатність здійснювати рух ПР із досить високою потужністю або швидкістю. Приведення в дію даного типу ПР можливе або за

допомогою використання серводвигунів постійного струму, або крокових електродвигунів постійного струму.



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд пневматичного сервоприводу від фірми Sealant Equipment & Engineering Inc

Дана ПС може добре підходити як для обертових так і для лінійних суглобів ПР. Електрична ПС буде ідеально підходитиме для невеликих ПР і точних застосувань. Найбільш важливим є те, що електропривод має більш високу точність та повторюваність. Недоліком даної ПС є те, що електропривід є трохи дорожчим. Прикладом ПС цього типу є ПР Maker 110 (рис. 1.3) [1].

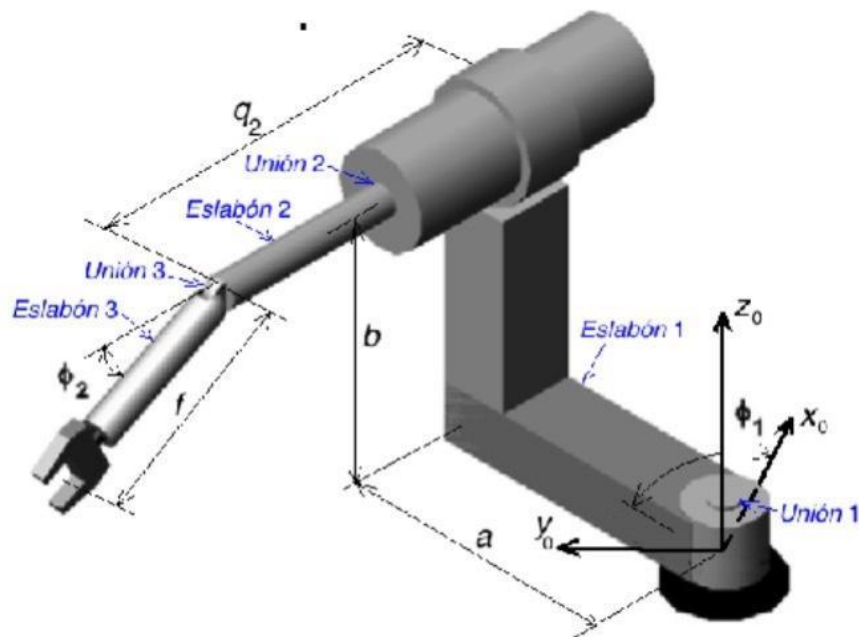


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд ПР Maker 110

У даній кваліфікаційній роботі ми будемо використовувати електричну ПС із безконтактним моментним приводом (БМП).

1.2 Відомі принципи керування ПР

ПР повинен мати систему керування для того, щоб керувати його ПС, яка використовується для переміщення руки, зап'ястя або всього тіла ПР в різних напрямках. При порівнянні ПР щодо систем керування, їх можна класифікувати на чотири основні типи [1-8]:

- ПР відтворення: з керуванням «point-to-point» (або двоточкове) та із керуванням безперервною траєкторією;
- ПР обмеженої послідовності;
- інтелектуальні ПР.

ПР відтворення здатні виконувати завдання шляхом вивчення положення. Дані положення зберігаються в пам'яті та досить часто виконуються за допомогою ПР. Як правило, дані ПР застосовуються зі складною системою керування.

Дані ПР можливо класифікувати на два важливих типи:

- ПР із двоточковим керуванням;
- ПР із керуванням безперервної траєкторії.

ПР із двоточковим (або point-to-point) керуванням коротко називаються РТР. Дані ПР навчають бажаних траєкторій, які зберігаються в пам'яті пристрою керування. Дані ПР не переміщуються від потрібного положення для керування його траєкторією. Вони можуть бути переміщені на невелику відстань тільки за допомогою програмування. ПР даного типу можуть бути використані для виконання ТО точкового зварювання, ТО навантаження чи розвантаження, а також для виконання бурових робіт [1, 2, 5, 6].

ПР із керуванням безперервною траєкторією. ПР даного типу можуть контролювати шлях переміщення та зупинятися в будь-якому вказаному

положенні. Дані ПР зазвичай виконують рух по прямій лінії. Початкова та кінцева точки спочатку описуються людиною-програмістом, а блок керування визначає індивідуальні суглоби. Це допомагає ПР виконувати рух по прямій лінії.

Крім того, даний ПР також може переміщатися по криволінійній траєкторії, переміщаючи його руку в потрібних точках. У даних ПР мікропроцесор використовується в якості контролеру. Деякі із застосувань: ТО дугове зварювання, ТО фарбування розпиленням та ТО склеювання.

ПР обмеженої послідовності об'єднані в своїй будові з механічними обмежувачами та кінцевими вимикачами для визначення кінцевих точок своїх суглобів. Дані ПР не потребують будь-яких програм, а просто використовують маніпулятор для виконання ТО. У результаті, кожен суглоб може переміщатися тільки в заданих межах. Це розглядають як найменший рівень керування, і такі ПР добре підходять для виконання простих ТО, таких як захват і переміщення об'єкту. ПР даного типу, як правило, оснащені пневматичною ПС.

Інтелектуальні ПР можуть відтворювати заданий рух, а також можуть працювати відповідно до навколишнього середовища.

Вони використовують ЕОМ в якості контролеру. Давач вбудований у ПР для отримання інформації під час ТП. Мова програмування буде ґрунтуватися на мові високого рівня. ПР даного виду здатні здійснювати зв'язок із програмістами на рівні роботи. Інтелектуальні ПР будуть найкращим вибором для ТО дугового зварювання або ТО складання виробів [1-8].

Сучасні ПР керуються принципами зворотного зв'язку, підлеглого керування та ієрархії системи керування (СК) ПР.

Ієрархія СК ПР передбачає поділ СК на горизонтальні шари, які контролюють загальну поведінку ПР, розрахунки необхідної для маніпулятора траєкторії руху, поведінки ПС та шарів, які безпосередньо беруть участь в керуванні електродвигуном.

Підлегле керування використовується для побудови СК електроприводом.

За необхідності побудови СК ПС за положенням (наприклад, кут обертання системи маніпулятора), СК замкнута зворотним зв'язком за положенням, і в межах СК положенням СК швидкістю працює зі зворотним зв'язком за швидкістю, усередині якої міститься петля керування струмом з її власним зворотним зв'язком.

Сучасний ПР оснащений не лише швидкістю положення і зворотними зв'язками прискорення елементів. Під час захвату потрібних деталей ПР повинен знати, чи виконав він захват деталі. Якщо деталь крихка або її поверхня має високий ступінь чистоти, складні СК будуються із силовим зворотним зв'язком, що дає змогу ПР виконати захват деталі без пошкодження поверхні та не руйнуючи її.

Керування ПР може виконуватись як людиною-оператором, так і СК промислового підприємства, що відповідає діям ПР з готовністю заготовок і машин із числовим програмним керуванням для ТО.

Для керування практично всіх ПР сьогодні використовуються або вбудовані мікропроцесори або допоміжні ПК. Вони виконують усі необхідні обчислювальні функції, а також керують пов'язаними давачами, захватними пристроями, оснащенням та іншим пов'язаним із ними периферійним обладнанням. СК виконує необхідну послідовність і запам'ятовує функції для он-лайн зондування, розгалуження, а також інтеграції іншого обладнання.

Програмування PLC може здійснюватися он-лайн або у віддалених автономних станціях керування із передачею електронних даних програм.

Можливість самодіагностики для технічного обслуговування та пошуку несправностей значно знижує простій системи ПР.

Деякі PLC ПР мають достатню пропускну здатність з точки зору обчислювальної здатності, ємності пам'яті та здатності служити також в якості системних PLC і справлятися з багатьма іншими машинами та ТП. Програмування PLC і систем ПР не були стандартизовані робототехнічною промисловістю; тому, виробники використовують власні мови програмування,

які вимагають спеціальної підготовки персоналу [1-8].

1.3 Класифікація систем керування рухом інструмента

СК рухом інструменту ПР класифікують як позиційну, циклічну та контурну.

Позиційна СК встановлює не лише послідовність команд, а й положення всіх частин ПР, вона використовується для виконання складних маніпуляцій із великим числом точок позиціонування. У даному випадку траєкторія переміщення інструменту не контролюється між окремими точками і може відхилятися від прямої лінії, що в свою чергу з'єднує дані точки.

Багатопозиційна СК призначена для передачі проміжних точок, не зупиняючись, при збереженні заданої швидкості. С достатньою частотою проміжних точок дана СК забезпечує рух інструменту вздовж вказаної траєкторії, і, тому, може бути використані, наприклад, для ТО дугового зварювання. Проте, реалізація програми в пам'яті ПР вимагає значного часу.

Циклічна СК є найпростішою, як правило, запрограмовано лише дві позиції: початок та кінець траєкторії руху інструмента. В роботах із циклічною СК широко використовується пневматична ПС.

Контурна СК задає рух робочому інструменту у вигляді безперервної траєкторії або ланцюга і в будь-який момент часу визначає не лише положення ланок маніпулятора, а й вектор швидкості руху інструменту. Дана СК забезпечує рух інструменту по прямій лінії або по колу, відповідно, встановивши дві або три точки секцій траєкторії. Це значно спрощує навчання ПР, тому що деякі частини шляху можна інтерполювати дугами кіл і відрізків. Роботи з контурною СК використовуються для ТО дугового зварювання та ТО термічного різання [1-8].

1.4 Керування ПР на основі PLC

Оскільки контролери ПР стали більш досконалыми, вони додають функціональність і можливості, які колись були сферою компетенції лише PLC.

1.4.1 Короткі характеристики існуючих PLC

PLC - це цифрові комп'ютери, що використовують програми, розроблені з релейною логікою для керування автоматизацією електромеханічних процесів [17-19]. На відміну від споживчих комп'ютерів, PLC дуже надійні й можуть експлуатуватися майже без зупинок.

PLC замінили електричні системи реле в автоматизації ТП та контролі більшості промислових, комерційних і наукових складних систем. Виконуючи одне й те саме завдання, що й електричні реле, PLC вмикають і вимикають електричний потік.



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд Smart relay Zelio Soft от Schneider Electric

Однак, через використання логіки у відповідь на практично необмежену кількість значень у режимі реального часу для визначення послідовності електричного потоку СК приводиться в дію без присутності людини. PLC використовуються майже в кожній заводській установці, де є технологія лінії складання та автоматизовані процеси.

PLC також використовувати для керування такими приладами, як системи освітлення, посудомийні машини та комп'ютерна периферія [17-20].

1.4.2 Значення та функції PLC

Найважливішим аспектом PLC є те, що він може реагувати на майже необмежену кількість вхідних даних. Єдине обмеження можливостей PLC виникає через числа давачів, розташованих для доставки даних на його логічні процесори та здатності його логічного програміста передбачити потенційні обставини. Логічні процесори PLC не здатні ухвалювати рішення, які перевищують параметри запрограмованої логіки, але, на відміну від електричних релейних систем, немає механічної границі на вхідні значення, які пристрій може отримувати або вихідні, які він може спрямовувати [21].

Більшість PLC використовують у складних СК для реагування на величини, отримані з під'єднаних до нього давачів у реальному часі. Вони можуть бути спроектовані для взаємодії з людиною-оператором і вони можуть використовувати peer-to-peer (P2P) зв'язок з іншими блоками PLC у СК.

PLC мають здатність реагувати з цифровою швидкістю обробки на величезні кількості даних у реальному часі. PLC з використанням P2P зв'язку може реагувати швидше, ніж будь-яка людина в режимі реального часу в межах складних СК.

Використання, так званих, «санітарних перевірок» як стандарту в програмуванні PLC дає змогу пристрою отримувати початкові вхідні значення із СК під час увімкнення живлення, щоб визначити, що все обладнання в СК працює правильно. Дані перевірки виконуються протягом кількох хвилин, а не годин, як знадобилося б людині для виконання тих самих оперативних перевірок вручну.

PLC дає змогу контролювати та реагувати на складні СК автоматично. Деякі з функцій, які виконує PLC, включають: послідовне керування реле, керування рухом, керування ТП, розподіленими СК, контроль позиціонування,

контроль крутного моменту та мереж.

PLC створено для того, щоб витримувати електричний шум, підвищення температури, вібрації та вплив функції одиниць PLC у нестабільних умовах протягом достатньо тривалих періодів часу та передавати достовірні показання для аналізу та прийняття рішень. По суті, функцією PLC є реагування, координація та керування складними електромеханічними процесами [17-21].

1.4.3 Типи PLC

Унітарний PLC (рис. 1.5) - більш простий тип контролера та містить усі основні компоненти системи в одній коробці чи корпусі. Дані компоненти зазвичай містять CPU, який керує програмним забезпеченням, на додаток до портів для вихідних та входних приєднань. Унітарні PLC, як правило, кріпляться безпосередньо до пристрою, що повинен контролюватись або додатку [21].



Рисунок 1.5 – Загальний вигляд Micrologix 1000 фірми Allen Bradley

Найбільш поширений приклад унітарного типу PLC - Micrologix 1000, створений фірмою Allen Bradley (рис. 1.5). Модель Micrologix 1000 містить вбудовану пам'ять для зберігання програм, 32 цифрові входні та вихідні порти та окремий порт зв'язку, що використовується для програмування пристрою. Дана комплектація характерна для багатьох унітарних систем [22].

Модульний PLC містить кілька різних модулів, які можуть бути об'єднані разом, щоб побудувати індивідуальний контролер. Як правило, базовий модуль включає в себе наступні основні функції - електричне регулювання потужності,

CPU комп'ютера та вхідні з'єднання. Додаткові модулі, зокрема аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) сигналів або додаткові виходи, можуть бути додані до даного базового пристрою при необхідності. Така модульна конструкція дає можливість легко налаштувати та модернізувати PLC.



Рисунок 1.6 – Загальний вигляд Micrologix 1200 фірми Allen Bradley [22]

Модель Micrologix 1200 фірми Allen Bradley (рис. 1.6) є широко використовуваним прикладом модульного типу PLC. Даний PLC може обробляти від 23 до 40 підключених входів та виходів. Фактичну кількість підключень легко розширити шляхом приєднання спеціальних модулів. Це забезпечує широкий діапазон гнучкості та, є досить, типово для модульного PLC.

Тип PLC із виконанням монтажу на стійці схожий на модульну концепцію PLC, але реалізується по-різному. У той час, як кожен модуль у модульному PLC під'єднується до базового блоку безпосередньо, PLC із монтажем на стійці тримає кожен модуль окремо. Усі додаткові модулі підключаються через мережу і модулі зберігаються в організованих стійках. Такий підхід залишає великі системи простими за конструкцією. Модулі добре організовані на стійці та можуть бути видалені і повторно змонтовані в при необхідності [22, 23].

Комерційний блок SLC 500 фірми Allen Bradley (рис. 1.7) є прикладом PLC із виконанням монтажу на стійці промислового стандарту. В конструкції практично відсутні обмеження на кількість встановлених модулів, кожен з яких монтується на стандартних шасі стійки. Ця установка може використовуватись

для великих, масштабних рішень автоматизації та є загальною для усіх заводських налаштувань.



Рисунок 1.7 – Загальний вигляд SLC 500 фірми Allen Bradley [22, 23]

1.4.4 Переваги застосування PLC

PLC були створені у зв'язку із потребами автомобільної промисловості. Однак, у подальшому інші галузі промисловості зі складними електромеханічними системами знайшли для себе безліч переваг використання PLC.

Хоча релейна логіка є саме тією мовою програмування, що має найширше використання в PLC, можуть бути використані також і інші мови та логічні системи (SFCS, мнемоніка та структурований текст ST). Це значно знижує вартість перепідготовки спеціалістів та надає можливість використовувати мови та структури, які є специфічними для потреб промисловості [17-23].

Так звана «Санітарна перевірка» та інші вбудовані в PLC аспекти усунення неполадок зменшують термін простою, надають можливість швидко оцінити й усунути проблеми людині-оператору.

Використання даної цифрової обчислювальної логіки дає можливість промисловості автоматизувати й керувати набагато складнішими системами, якщо вони базуються або на обчисленнях людини-оператора, або на компоненти електричних релейних регуляторів.

1.5 Постановка завдань для автоматизації системи керування швидкістю безконтактного електроприводу

Для досягнення мети кваліфікаційної роботи необхідно вирішити наступні завдання:

- розглянути СК швидкістю безконтактного електропривода розроблену на основі PLC;
- здійснити вибір та розрахунок вентильного електродвигуна;
- виконати моделювання СК швидкістю зі схемою векторного керування електродвигуном та дослідити характеристики;
- здійснити вибір PLC для спроектованої СК;
- виконати перевірку отриманих результатів розрахунків за допомогою моделювання у програмному середовищі Simulink MATLAB.

1.6 Висновки до першого розділу

Виконано аналітичний огляд та аналіз існуючих технічних рішень приводних систем промислових роботів, описано основні принципи приводних систем. Розглянуто існуючу класифікацію систем керування рухом інструмента промислового роботу.

Описано принципи керування ПР на основі PLC, на базі чого виконано постановку завдань для автоматизації системи керування швидкістю безконтактного електроприводу ПР.

2 МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ БЕЗКОНТАКТНОГО ПРИВОДУ

2.1 Узагальнена функціональна схема системи керування швидкістю з використанням вентильного електродвигуна

Вентильні електродвигуни (ВД) [7, 50], які використовують у складі електроприводів та СК, вимагають, за звичай, стабілізації або виконання регулювання швидкості обертання. У більшості випадків для цього використовують загальний принцип керування за відхиленням керованої величини, відповідно з яким задане значення швидкості обертання електродвигуна Ω_s порівнюється із фактичним вимірним значенням швидкості обертання Ω_T і тоді обраховане відхилення (помилка) швидкості обертання $\Delta\Omega = \Omega_s - \Omega_T$ посилюється та перетворюється в керуючий (задаючий) вплив електродвигуна [7].

В якості математичної моделі електроприводу з ВД будемо використовувати математичний опис узагальненої електричної машини (ЕМ) та спеціальних вузлів підсилювально-перетворювального пристрою (ППП). Будучи, так би мовити, проміжною ланкою між експериментальними та теоретичними дослідженнями, моделювання дає змогу усунути труднощі, якими характеризуються дослідження.

Виконуючі порівняння із теоретичними дослідженнями, моделювання ВД полегшує оцінку впливу реакції якоря, насичення магнітного кола, нелінійностей та можливих перешкод в електронних та електромеханічних пристроях; спрощує розрахунок характеристик за наявності кіл корекції та аналіз СК за наявності декількох постійних часу (більше двох).

На рисунку 2.1 зображено векторну діаграму двофазного синхронного електромеханічного перетворювача (СЕМП) у системах координат α, β та d, q

(причому вісь d спрямована за віссю збудження ротора (та збігається із напрямком вектору потоку Φ_r). Система d, q виконує обертання проти годинникової стрілки відносно системи α, β з кутовою швидкістю ω .

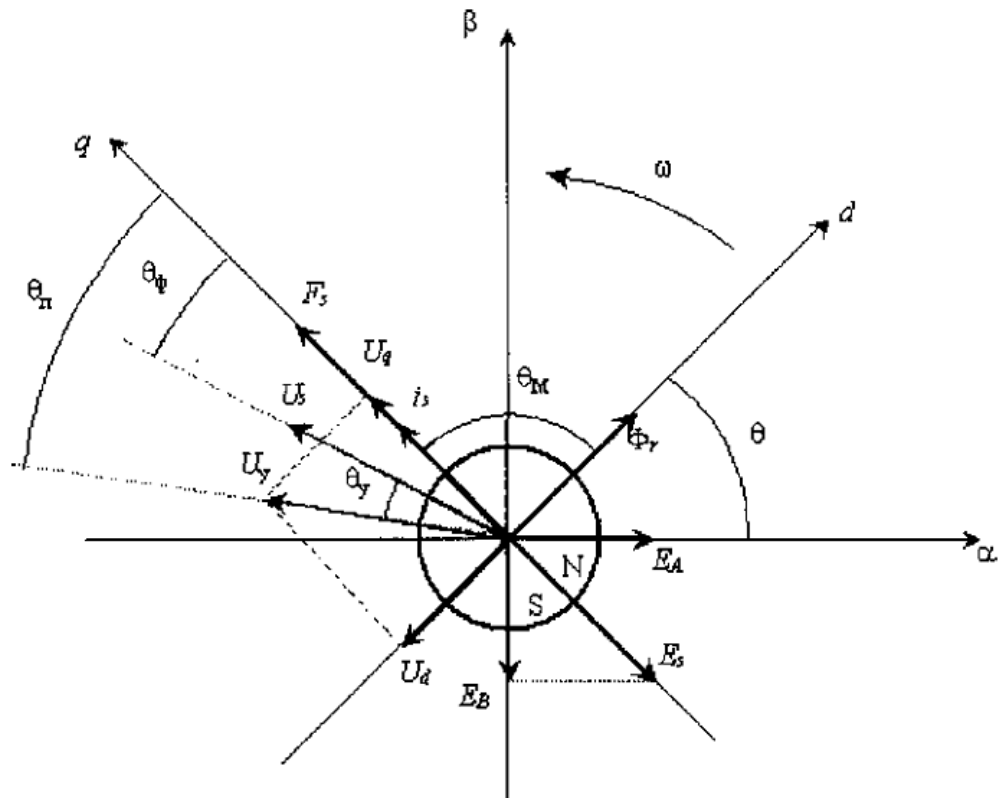


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд векторної діаграми СЕМП

За необхідності спрямувати вектор сили струму статора I_s за напрямком осі q , вектор напруги U_s повинен бути спрямований з випередженням на деякий кут θ , що характеризує відставання сили струму від напруги в ланцюзі із наявністю індуктивності. В ВД вектор напруги статора U_s формується електронним ППП, що складається з підсилювачів потужності (ПП) фаз та перетворювача координат (ПК) [24, 25, 50].

Під час роботи двофазного СЕМП із постійними магнітами розташованими на роторі та взаємно перпендикулярними фазами А та В статорної обмотки у складі ВД, керування здійснюється електронним ППП, що формує фазні напруги за будь-яким заданим законом.

ПК - це спеціалізований пристрій для обчислення, що реалізує рівняння перетворення величин із рухомої системи координат, пов'язаної з ротором, у нерухому, пов'язану зі статором [7, 12, 24, 25, 50]. Функцію ПК можливо реалізувати, при цьому ПК реалізує наступний алгоритм:

$$\begin{aligned} U_{\alpha} &= k_{ПК} \cdot \left[-U_q \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) \right] \\ U_{\beta} &= k_{ПК} \cdot \left[U_q \cdot \sin \Theta \right], \end{aligned} \quad (2.1)$$

де $k_{ПК}$ - постійний коефіцієнт передачі ПК.

ПП - підсилювач, що працює в даному випадку в режимі посилення сигналу напруги (інвертора напруги) та описується за допомогою постійного коефіцієнту передачі за напругою k_{PA} . З урахуванням даного коефіцієнта рівняння фазної напруги мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} U_A &= k_{PA} \cdot U_{\alpha}; \\ U_B &= k_{PA} \cdot U_{\beta}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Таким чином, ППП можливо охарактеризувати деяким коефіцієнтом передачі згідно із формулою:

$$k_A = k_{PA} \cdot k_{PC}. \quad (2.3)$$

ППП може бути охарактеризовано за кожним каналом, як, наприклад, динамічну ланку першого порядку за допомогою використання еквівалентної сталої часу T_e , що обумовлює зсув фаз $\theta_y = \tan \omega \cdot T_e$ між векторами напруги керування U_c та напруги на статорі U_{st} , а також коефіцієнтом передачі k_A .

Виконавши підстановку (2.1) в систему рівнянь (2.2) та враховуючи

запізнювання, що зумовлені сумарною інерційністю ПК та ПП, записуються диференціальні рівняння для фазних напруг ВД у нерухомій системі координат [7, 12, 24, 25, 50].

Запишемо диференціальні рівняння для фазних напруг ВД в α, β нерухомій системі координат відносно невідомих:

$$T_y \cdot \frac{dU_A}{dt} + 1,73 \cdot U_A = -U_q \cdot k_y \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) \right]; \quad (2.4)$$

$$T_y \cdot \frac{dU_B}{dt} + U_B = k_y \cdot [U_q \cdot \sin \Theta]. \quad (2.5)$$

Запишемо рівняння для сил струму обмоток статора:

$$\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) = \cos \Theta; \quad (2.6)$$

$$2 \cdot T_\varphi \cdot \frac{di_A}{dt} + i_A = \frac{1}{2 \cdot R} \left(1,73 \cdot U_A + C_E \cdot \Omega \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) \right] \right); \quad (2.7)$$

$$2 \cdot T_\varphi \cdot \frac{di_B}{dt} + i_B = \frac{1}{R} (U_B - C_E \cdot \Omega \cdot \sin(\Theta)). \quad (2.8)$$

Тоді рівняння для визначення крутного моменту буде мати наступний вигляд:

$$\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) = \cos \Theta; \quad (2.9)$$

$$M = C_M \cdot (i_B \cdot \sin \Theta - i_A \cdot \cos \Theta). \quad (2.10)$$

Рівняння рівноваги моментів прикладених до валу електродвигуна матиме наступний вигляд:

$$\frac{J \cdot d\Omega}{dt} = M - M_B, \quad (2.11)$$

де θ_0 - початковий кут виставки давача положення ротора;

k_A - коефіцієнт передачі ППП;

i_A, i_B - сила струму у фазах A, B ;

U_d, U_q - величина напруги на входах d, q ;

U_a, U_b - величина напруги у фазах A, B ;

C_M - коефіцієнт моменту;

M_B - момент навантаження з боку дії сили збурення;

J - момент інерції ротора із урахуванням дії навантаження.

2.2 Моделювання роботи вентильного електродвигуна

Для побудови комп'ютерної моделі електроприводу з ВД будемо використовувати програмний пакет MATLAB [26-28].

Під час виконання моделювання доцільно дотримуватися наступної черговості дій:

- створити структурну схему СК в середовищі Simulink, попередньо виконавши в диференціальних рівняннях зручне для моделювання в програмному пакеті MATLAB перетворення Лапласа;

- використавши вбудовану бібліотеку Sources вказати дію впливу (керуючий сигнал, тощо);

score - осцилограф);

- виконати запуск створеної моделі та провести аналіз.

Використовуючи систему рівнянь (2.1-2.11), в інструментальному додатку Simulink програмного пакету MATLAB [26-28] було розроблено модель двофазного ВД на базі СЕМП типу ДБМ 150-4-0,6-2 [24-25] зі схемою векторного керування (див. рис. 2.2) [50].

Модель БМП з векторним керуванням наведено на рисунку 2.3.

Модель СК швидкістю БМП із векторним керуванням наведена на рисунку 2.7. Задана швидкість на вході системи дорівнює половині величини швидкості холостого ходу (див. рис. 2.6). Разом із моментом навантаження, що дорівнює чверті значення пускового моменту ($M_{w.p.} = 4 \text{ Н*м}$), ці значення швидкості та моменту визначають робочу точку на МХ СК.

Швидкість зі входу порівнюється з результативною швидкістю та далі надходить на регулятор швидкості (РШ). Коефіцієнт РШ $k_{RS} = 15$ обраний експериментально і забезпечує допустимі перехідні процеси СК швидкістю, а також найменше падіння значення швидкості відносно заданого значення швидкості. У схемі також використовується обмежувач, що обмежує величину напруги U_q (не вище 27 В постійного струму). Блок VD являє собою ВД (див. рис. 2.3) та блок СТ - ПК, модель якого наведено на рисунку 2.5. Регулятор R2 та його коефіцієнт підібрано експериментальним шляхом у процесі виконання моделювання схеми векторного керування [50].

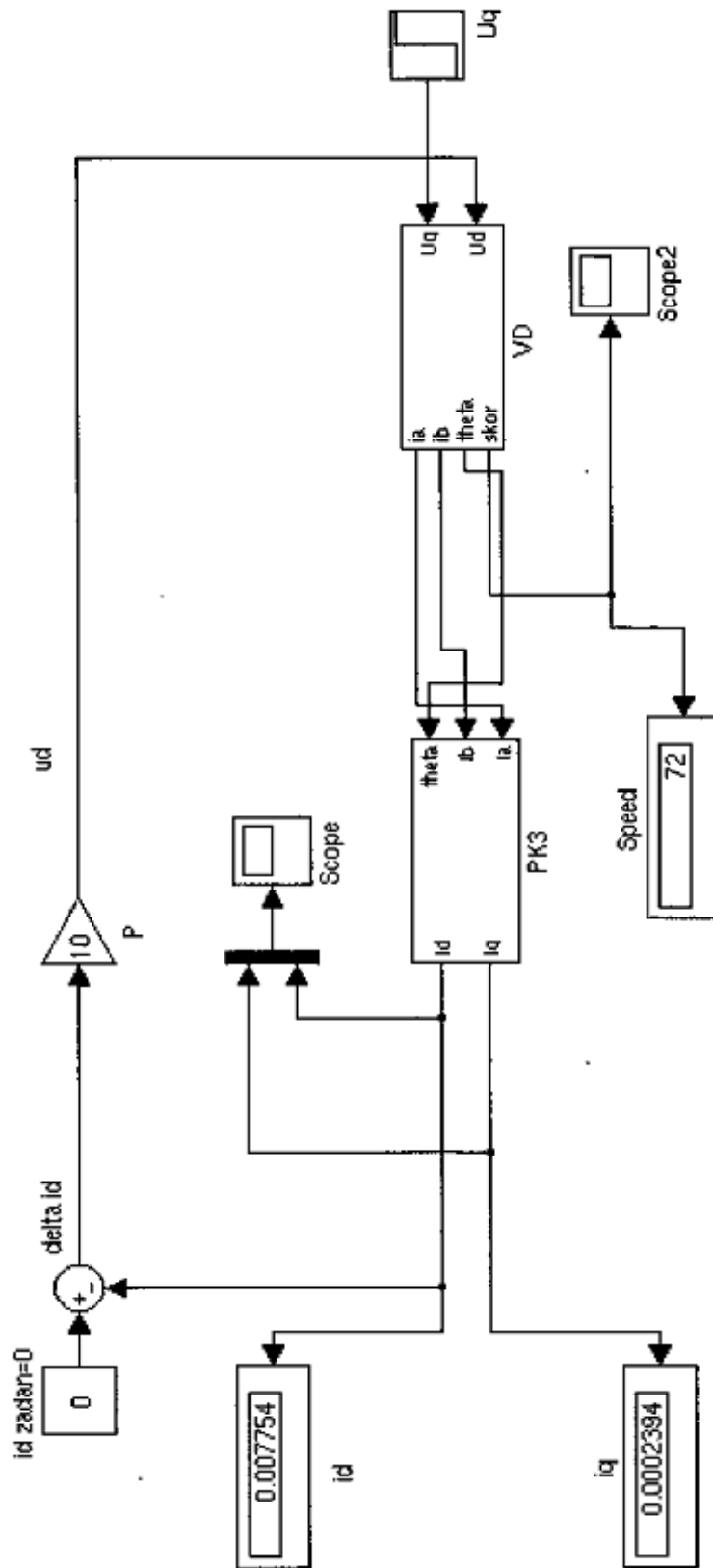


Рисунок 2.3 – Розроблена модель безконтактного приводу з векторним керуванням [26-28]

Step

Output a step.

Parameters

Step time:
0

Initial value:
0

Final value:
27

Sample time:
0

Interpret vector parameters as 1-D

Enable zero-crossing detection

Рисунок 2.4 – Завдання величини вхідної напруги в БМП із векторним керуванням

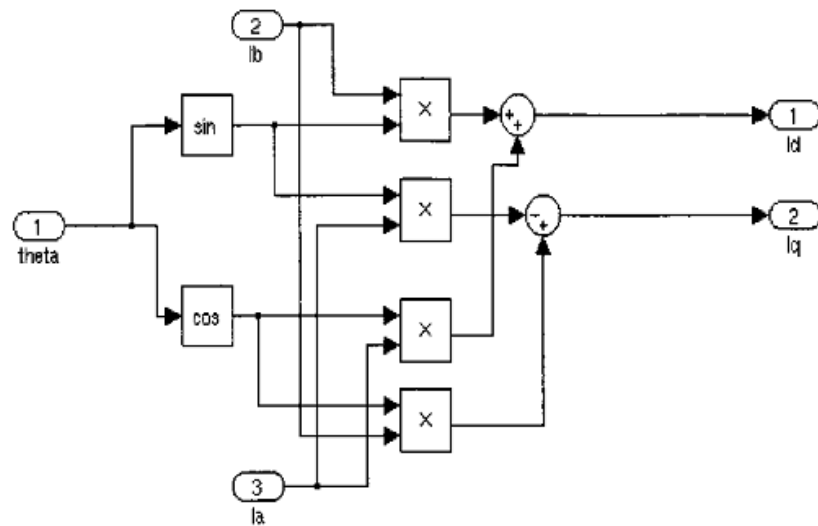


Рисунок 2.5 – Загальний вигляд моделі ПК

Step

Output a step.

Parameters

Step time:
0

Initial value:
0

Final value:
36

Sample time:
0

Interpret vector parameters as 1-D

Enable zero-crossing detection

Рисунок 2.6 - Задана швидкість у моделі СК швидкістю БМП з векторним керуванням [26-28]

Результати моделювання СК швидкістю БМП наведені на графічних залежностях перехідних процесів для розімкнутої системи без навантаження та за пускового моменту навантаження (рис. 2.8, 2.9) [26-28].

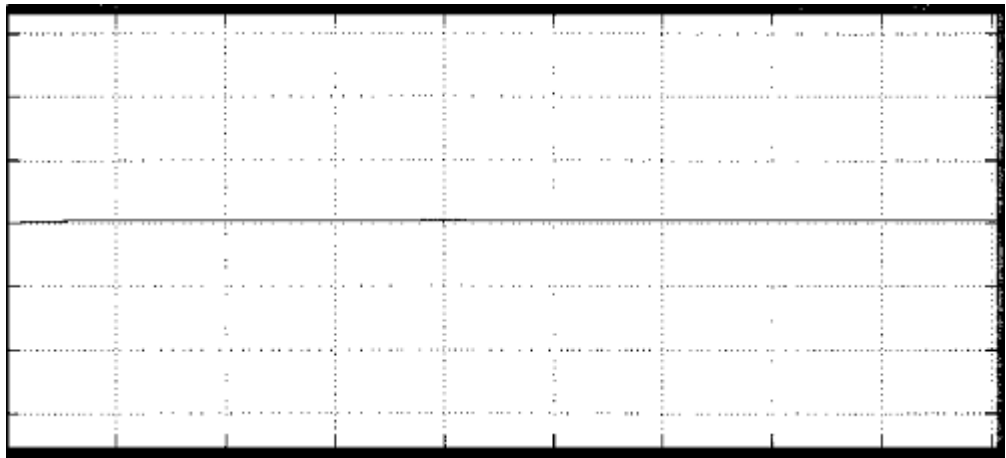


Рисунок 2.8 – Графічна залежність перехідного процесу при величині пускового моменту $M = 12 \text{ Н} \cdot \text{м}$ для розімкнутої системи

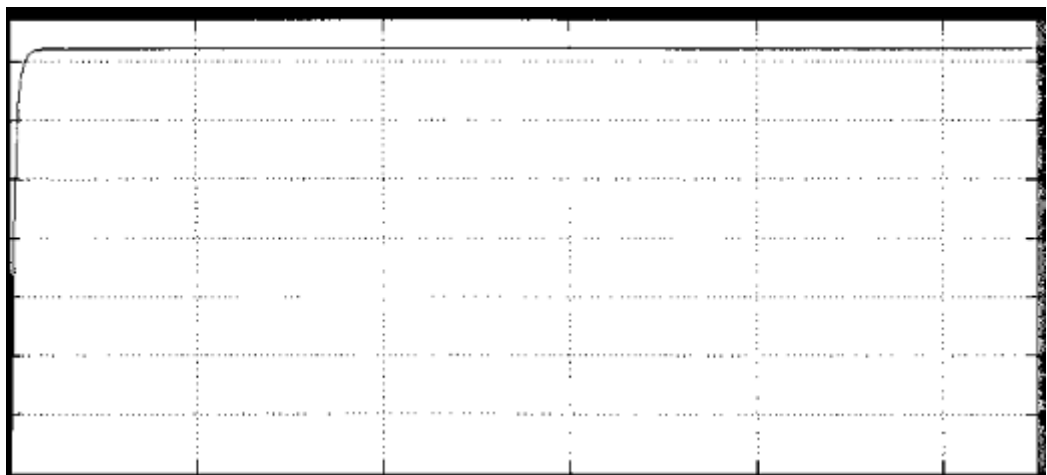


Рисунок 2.9 – Графічна залежність перехідного процесу без навантаження ($M = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$) для розімкнутої системи

Графічні залежності перехідних процесів СК швидкістю БМП в робочій точці ($\Omega_s = 36 \text{ рад/с}$, $M_i = 4 \text{ Н} \cdot \text{м}$) представлено на рисунку 2.10 та у випадку відсутності прикладеного навантаження ($\Omega_s = 36 \text{ рад/с}$, $M_i = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$) на рисунку 2.11.

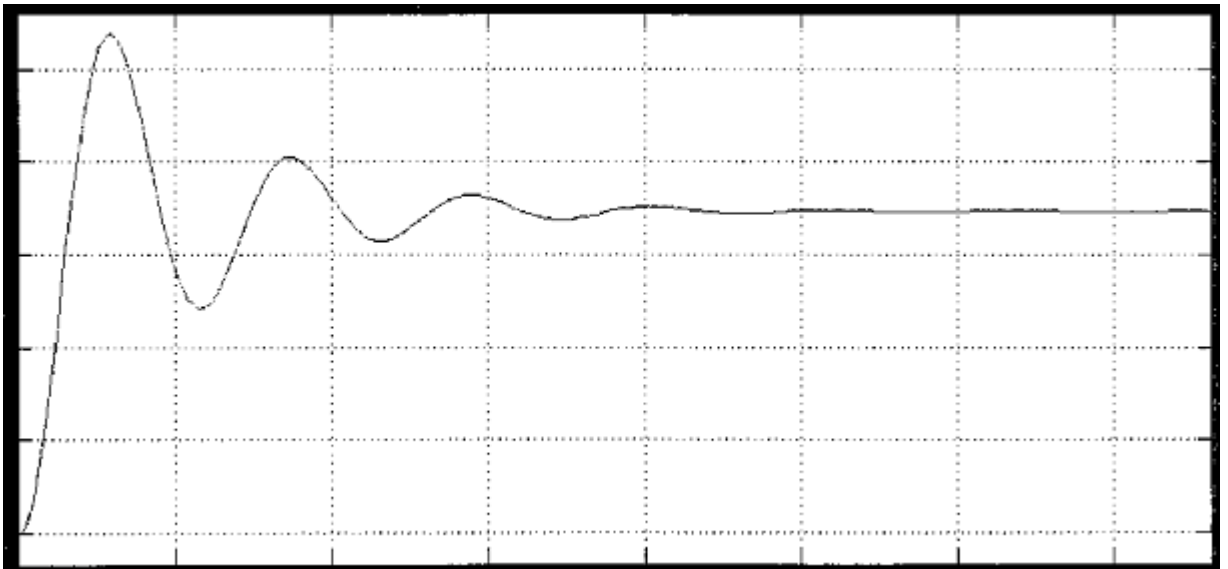


Рисунок 2.10 - Графічна залежність перехідного процесу в робочій точці

$$\Omega_s = 36 \text{ рад/с}, M_i = 4 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

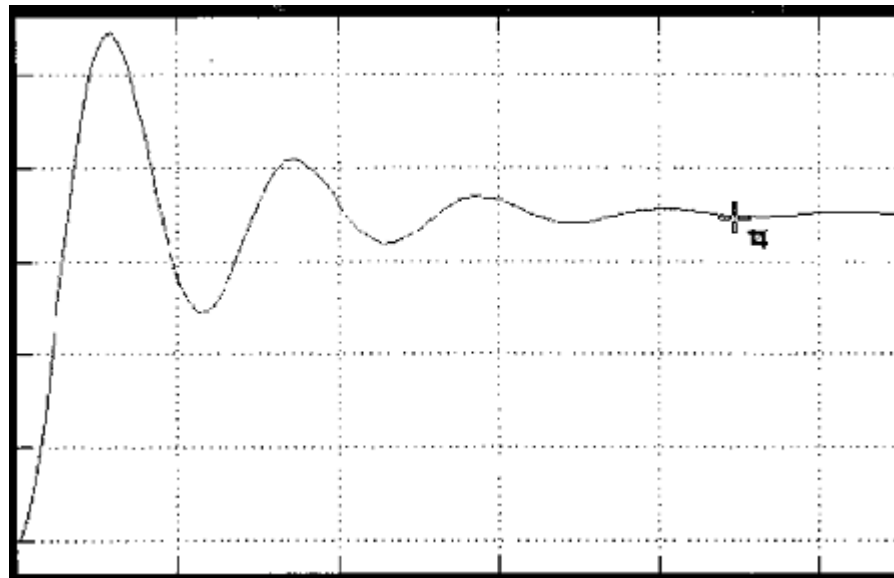


Рисунок 2.11 – Графічна залежність перехідного процесу без навантаження

Після аналізу характеристик наведених на рисунку 2.10 видно, що перегулювання становить приблизно 52%, показник коливання $M = 1.52$. Отже, запропонована система задовольняє встановленим вимогам тому, що показник коливальності нижчий, ніж задане значення $M = 1.7$ [26-28].

Результати зміни швидкості наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати моделювання СК

| Модель | Ω_s , рад/с | Ω_T , рад/с | Рівень падіння швидкості, % |
|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|
| З керуванням швидкістю | 36 | 34,6 | 3,6 |
| Без керування швидкістю | 72 | 53 | 26 |

Можна зробити висновок, що, згідно із отриманими результатами моделювання, розроблена СК швидкістю БМП забезпечує зменшення більш ніж у 7 разів падіння швидкості приводу під час зростання номінального моменту навантаження порівняно із нерегульованим приводом. Отже, дана система дає змогу підвищити якість роботи. Цей експеримент доводить, що отримана в результаті СК швидкістю БМП функціональна та задовольняє встановленим технічним вимогам [50].

2.3.2 Результати моделювання – механічні характеристики

Отримані МХ БМП типу ДБМ 150-4-0,6-2 представлено на рисунку 2.12.

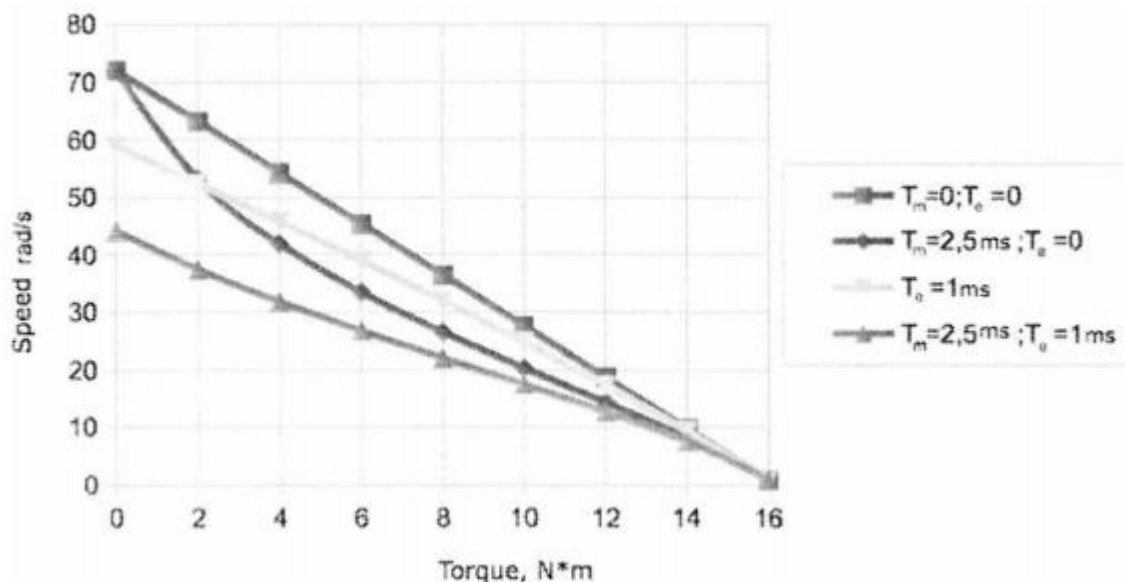


Рисунок 2.12 – Графічні залежності МХ БМП типу ДБМ150-4-0,6-2

У випадку, коли $T_T = 0; T_e = 0$ мс називається ідеалізованою МХ. Графічні

залежності показують, що МХ лінійна з характеристиками аналогічними характеристикам двигунів постійного струму із використанням роздільного збудження.

У випадку, коли $T_T = 2,5; T_e = 1$ мс графічні залежності показують, що коли змінюється електромагнітна постійна часу ВД T_T , швидкість холостого ходу залишається константою. Водночас ефект електромагнітної постійної часу T_T впливає на нелінійність характеристики, таким чином, можна спостерігати увігнутість МХ, за якою можна оцінити ефект впливу T_T .

З графічних залежностей рисунок 2.12 видно, що МХ мають нелінійний характер. Для усунення нелінійності МХ, тобто для усунення впливу постійних часу, використовуються схеми статичної корекції або векторне керування.

МХ ВД зі статичною корекцією наведено на рисунку 2.13.

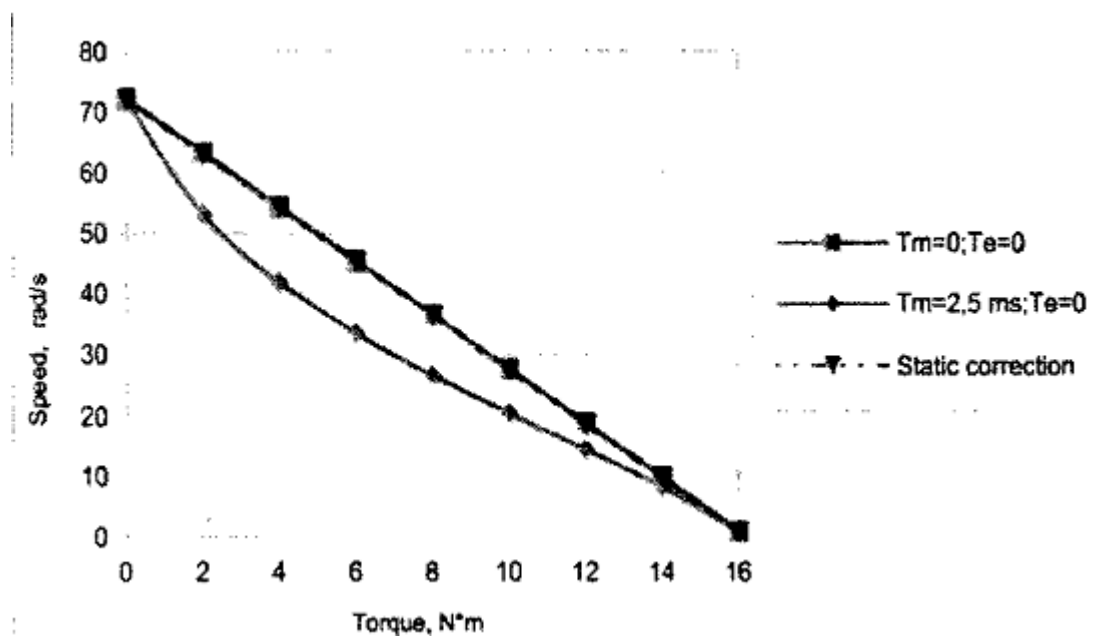


Рисунок 2.13 – Графічні залежності МХ ВД із статичною корекцією

Проте існує цілий ряд недоліків методу статичної корекції [24, 25]:

- незадовільна робота при зміні значень параметрів (параметри мають бути постійними);

- потрібне точне знання параметрів T_T, T_e, R, C_M, C_e .

У зв'язку з вище наведеними факторами, було прийнято рішення використовувати векторне керування БМП.

Доведемо працездатність схеми векторного керування для вентильного приводу. МХ для даної моделі наведено на рисунку 2.14.

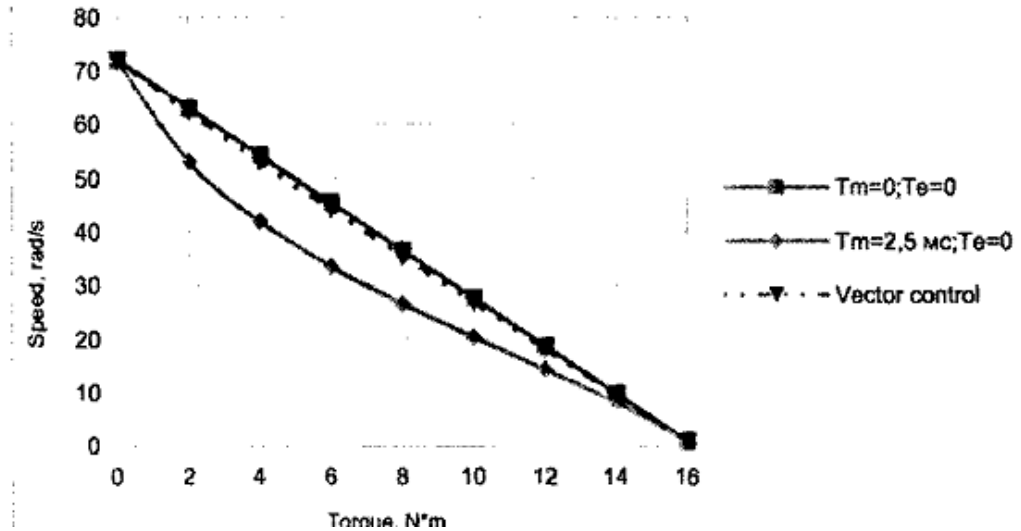


Рисунок 2.14 - Графічні залежності МХ для схеми векторного керування ВД

Графічні залежності наведені на рисунку 2.14 демонструють МХ ВД типу ДБМ 150-4-0,6-2: ідеалізовані ($T_T = 0; T_e = 0$ мс), із нелінійністю та за векторного керування. Очевидно, що векторне керування забезпечує роботу приводу із ефективністю, досить близькою до ідеальних значень.

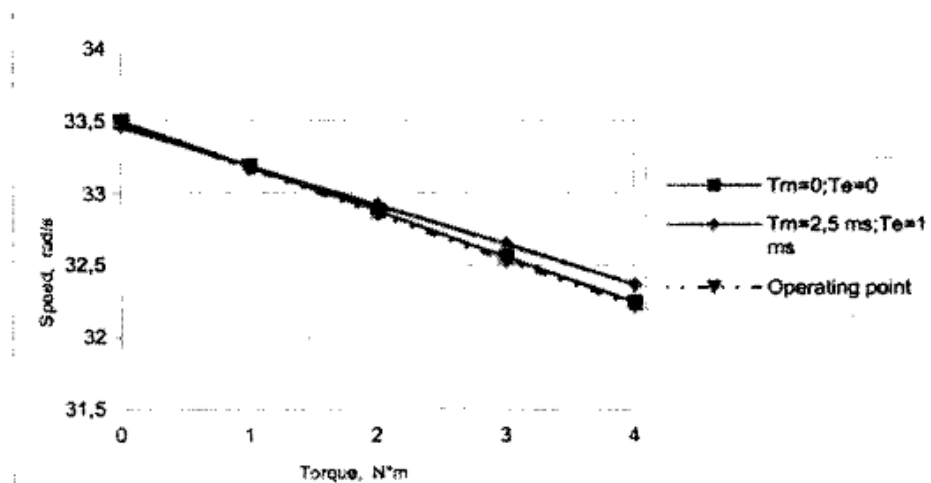


Рисунок 2.15 – Графічні залежності МХ СК швидкістю БМП

Далі представлено МХ як результат роботи СК швидкістю для вентильного приводу (рис. 2.15). Це характеристики: ідеалізована ($T_T = 0; T_e = 0$ мс), з нелінійністю ($T_T = 2,5; T_e = 1$ мс) та для обраної робочої точки ($\Omega_s = 36$ рад/с, $M_i = 4$ Н·м).

Очевидно, що в цьому випадку останній є кращим.

2.4 Висновки до другого розділу

Відповідно до результатів розрахунків та моделювання СК швидкістю ВД, можна зробити наступні висновки:

- СК швидкістю ВД зі схемою векторного керування, функціональність якої було змодельовано в програмному пакеті MATLAB, може ефективно компенсувати вплив постійних часу, що призводить до МХ ВД, близьких до ідеальних;

- векторне керування призводить до поліпшення динаміки всього приводу з ВД, що пояснюється підвищенням лінійності МХ електродвигуна;

- перехідні процеси СК швидкістю обертання БМП із обраними параметрами регуляторів контуру струму та швидкості задовольняють встановленим вимогам технічного завдання за показника коливальності $M = 1.52$, що не перевищує заданого значення показника $M = 1.7$;

- розроблена СК швидкістю БМП забезпечує величину падіння швидкості обертання ВД під час зростання номінального моменту навантаження в 7 разів меншу, ніж при використанні системи без схеми керування швидкістю обертання, що дає змогу підвищити якість роботи.

3 РОЗРОБКА МЕТОДУ КЕРУВАННЯ БЕЗКОНТАКТНИМ ПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

3.1 Підбір двигуна для системи керування швидкістю безконтактного приводу

Перші приводи змінної швидкості були механічними і були засновані на шківках із регульованим діаметром головного валу. Такі системи залишаються корисними, але зі зрозумілих причин не перебувають сьогодні в загальному використанні в промисловості [9-13, 24, 25]. Існують чотири основні типи електрично регульованих приводів, на базі електродвигунів наступних видів:

- щіткові електродвигуни постійного струму (ПС);
- асинхронні електродвигуни (АД) з частотним керуванням;
- АД із векторним керуванням;
- безщіткові ЕПС.

3.1.1 Щіткові ЕПС

Щіткові електродвигуни із керуванням за якорем (рис. 3.1). Даний тип ЕПС працює за наступним принципом, що швидкість обертання головного валу перебуває в прямій залежності від величини прикладеної напруги якоря. При нулі вольт, прикладених до якоря, електродвигун працюватиме з нульовою швидкістю обертання, у той час як за номінальної напруги (500 В постійного струму) електродвигун працюватиме на номінальній швидкості (1750 об/хв «стандартне» значення).

Електродвигун створюватиме крутний момент на підставі аналогічного співвідношення зі струмом. Крутний момент ЕПС буде змінюватися прямо пропорційно до сили струму якоря. Ці дві простих характеристики роблять ЕПС, як і раніше, найпопулярнішим засобом СК швидкістю у використанні сьогодні для промислового застосування з постійним моментом. ЕПС дуже ефективні в перетворенні електричної енергії в механічну з ККД від 90 до 92% для розмірів

ЕПС від 7,4 до 55,2 кВт. Ефективність контролера дуже висока і становить у середньому 98%, що робить сумарний ККД рівним від 88 до 90% у діапазоні від 3,7 до 55,2 кВт [9-13, 24, 25].

На жаль, тиристор, будучи ефективним пристроєм перетворення енергії, робить це шляхом зміни точки на формі сигналу напруги змінного струму, за якої починає текти струм. Це означає, що при середніх і низьких вихідних напругах, коефіцієнт потужності, при якому використовується потужність, дуже низький. У той час як кілька років тому це не було такою причиною для занепокоєння, енергетичні компанії сьогодні стають дедалі наполегливішими, щоб промислові споживачі зберігали коефіцієнти потужності принаймні до 0,8 або вище. Існують корисливі причини виробника електроенергії для того, щоб зберігати коефіцієнт потужності високим, оскільки він зменшує розмір трансформаторів, вимикачів, запобіжників і провідників в енергосистемі [9-13, 24, 25].

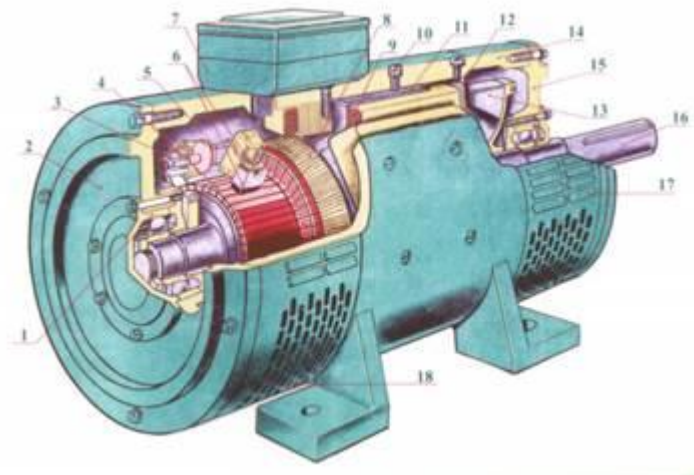


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд ЕПС із щітками

Традиційний ЕПС потребує двох джерел сили струму: одне для обмотки статора для забезпечення магнітного поля, а інше для обмотки ротора для взаємодії з магнітним полем і генерування ЕРС. Існують три способи досягнення цього, кожен із них призводить до унікальної характерної роботи електродвигуна. Через те, що всі конструкції використовують навиті ротори, всі

вони потребують комутатора для того, щоб подавати струм в обмотках ротора.

Швидкість обертання регулюється шляхом зміни величини напруги ротора і, отже, сили струму ротора або шляхом зміни магнітного потоку в повітряному зазорі за рахунок зміни сили струму в обмотках поля. З доступом до поля та обмоток ротора всі ЕПС надають можливість простого керування швидкістю обертання та крутним моментом.

ЕПС з послідовним збудженням володіє лише одним джерелом напруги електродвигуна тому обмотка збудження з'єднана послідовно із обмоткою ротора.

Характеристики: ЕПС із послідовним збудженням володіє поганим регулюванням швидкості обертання. Дана конструкція забезпечує зростання крутного моменту при підвищеній силі струму електродвигуна за рахунок швидкості обертання, яка падає зі зростаючими потребами крутного моменту.

Даний тип електродвигуна володіє дуже високим пусковим крутним моментом, оскільки існує нульова зворотна ЕРС за нульової швидкості обертання. Однак, як тільки починає зростати швидкість обертання, те саме робить і ЕРС, спричиняючи зменшення крутного моменту. Збільшення навантаження на електродвигун прагне його сповільнити, але це, в свою чергу, знижує зворотну ЕРС і збільшує крутний момент для розміщення навантаження.

Керування швидкістю обертання можливе шляхом зміни напруги живлення. За умов відсутності навантаження швидкість обертання зростатиме до небезпечних рівнів і може спричинити руйнування електродвигуна. Реверс з'єднань на полі або на обмотках ротора, але не на обох може призвести до реверсу електродвигуна.

Регенеративне гальмування неможливо виконати, оскільки необхідно зберігати силу струму поля, але це руйнується при проходженні сили струму ротора через нуль та відбувається реверс.

Область застосування - ЕПС із послідовним збудженням є досить поширеними у промисловості і для високої, і для малої потужності,

електроприводів з фіксованою і змінною швидкістю. Область застосування даного типу ЕПС варіюється від недорогих іграшок до автомобільної промисловості. Дана конструкція ЕПС недорога у виготовленні та використовуються в побутових приладах зі змінною швидкістю наприклад, швейні машини та електроінструменти. Високий пусковий крутний момент робить дану конструкцію ЕПС особливо придатною для широкого спектра транспортних пристроїв.

ЕПС із паралельним збудженням також володіє лише одним джерелом напруги електродвигуна, але в даному випадку обмотка підключається паралельно із обмоткою ротора.

Швидкістю обертання ЕПС із паралельним збудженням можна керувати в обмеженій мірі, не впливаючи на величину напруги живлення, за допомогою, так званого, «ослаблення поля». Реостат з'єднаний послідовно із обмоткою збудження може бути використаний для зменшення сили струму збудження. Це, в певній мірі, зменшує величину потоку у повітряному зазорі і, оскільки швидкість обертання обернено пропорційна потоку, електродвигун прискорюється. Однак, крутний момент прямо пропорційний величині потоку в повітряному зазорі, так що збільшення швидкості обертання буде супроводжуватися зменшенням крутного моменту [9-13, 24, 25].

Характеристики – ЕПС із паралельним збудженням обертається майже з постійною швидкістю, якщо величина напруги фіксована. Електродвигун може забезпечувати зростаючий крутний момент без помітного зниження швидкості обертання шляхом збільшення сили струму електродвигуна.

Як і ЕПС із послідовним збудженням, ЕПС із паралельним збудженням можна реверсувати шляхом реверсу з'єднань на полі або на обмотках ротора. Використання регенеративне гальмування можливе. Самозбудження зберігає поле, коли сила струму ротора реверсує.

Область застосування - використання із фіксованою швидкістю обертання, наприклад, вентилятори та автомобільні склоочисники.

ЕПС із незалежним збудженням має два незалежні джерела напруги в полі та обмотках ротора, що дають змогу більший контроль роботи електродвигуна.

Характеристики: Величина напруги обмотки ротора чи поля може бути використана для контролю швидкості обертання та крутного моменту електродвигуна з незалежним збудженням.

Область застосування - автомобільні та залізничні транспортні пристрої.

ЕПС на постійних магнітах, як зрозуміло із назви, ці ЕПС базуються на постійних магнітах, а не електромагнітах для забезпечення поля ротора або статора.

Область застосування - в невеликих ЕПС і дедалі більшою мірою в транспортних пристроях.

Магніти ротора - на сьогодні найпоширеніший тип ЕПС. У них відсутня обмотка ротора, але в конструкції є постійні магніти для постачання поля ротора і двигуни працюють як ЕПС з паралельним збудженням з фіксованим струмом шунта. Головна перевага - відсутність комутатора [9-13, 24, 25].

Магніти поля – дані ЕПС не мають поля обмотки, але використовують постійні магніти для забезпечення магнітного поля. Струм продовжує надходити на ротор через комутатор, як і в інших щіткових електродвигунах. Швидкість обертання можливо регулювати шляхом зміни величини напруги на обмотках ротора. Таким чином, поведінка схожа на ЕПС із послідовним збудженням.

3.1.2 PLC та АД змінного струму зі змінною частотою

З кількох типів доступних електроприводів змінного струму (ЗС) з частотним регулюванням зазвичай використовують в якості джерела напруги - ШІМ - синус-кодований тип. Для електроприводів загального призначення, потужністю понад 3,5 кВт, такі конструкції по суті є єдиним доступним типом. Даний тип джерела струму доволі поширений при потужності вищій за 73 кВт і насправді дає деякі переваги.

Одним універсальним аспектом керування швидкістю обертання АД є те,

що для створення електродвигуном корисного крутного моменту потрібне ковзання. Різні засоби підвищення продуктивності, такі як збільшення рівня напруги, компенсація ковзання, економія енергії шляхом відновлення рівня напруги, «скалярне» чи векторне керування нічого не роблять для зменшення ковзання, яке притаманне даній конструкції електродвигуна.

На повній швидкості, при повному навантаженні електродвигун ЗС буде проковзувати приблизно на 3% від синхронної швидкості обертання на основі конструкції електродвигуна. Конструкція встановленого PLC ніяк не впливає на даний процес проковзування. Таке проковзування являє собою втрати енергії в роторі ЕМ ЗС і перетворюється безпосередньо в тепло всередині електродвигуна, яке має розсіятися. Уже одна ця обставина робить ЕМ ЗС відносно обмеженою з точки зору повного діапазону теплової швидкості обертання крутного моменту [9-13, 24, 25].

Стандартний АД не може створювати повний крутний момент на діапазон швидкостей обертання більш ніж 2 до 1 без перегріву при безперервному режимі роботи. Енергетично ефективні типи можуть розтягнути даний діапазон швидкостей обертання приблизно до рівня 3 до 1 та спеціалізовані конструкції можуть збільшити діапазон до 10 до 1.

Динамічна характеристика стандартної ЕМ ЗС дуже обмежена смугою пропускання в діапазоні від 1 до 3 Гц. Електропривід ЗС із ШІМ - це електропривід, для застосування якого не потрібні високі пускові крутні моменти, швидкий динамічний відгук або значний усталений момент на низьких швидкостях.

Область застосування - насоси, деякі види конвеєрів та вентилятори.

Слід зазначити, що при розумному використанні комбінації високої ефективності або спеціальних конструкцій електричних двигунів можуть бути досягнуті набагато вищі значення крутних моментів, але за більш високої вартості. Однією з найбільш вагомих причин використання такого електроприводу є його відносно не висока вартість.

Іншою причиною того, чому ЕМ ЗС майже скрізь застосовують в якості приводу у вентиляторах і насосах, то можливість запуску стандартного електродвигуна ЗС, який можна обійти або який може працювати від мережі змінного струму в разі несправності контролера [9-13, 24, 25].

Можливість виконати таку дію наприклад, в муніципальній насосній системі, де транспортуються або стічні води або вода, вкрай важлива і в більшості випадків місця, де розташоване дане обладнання, віддалене і контролюється за допомогою або комп'ютера або PLC. Зондування несправності PLC та обхід - все це виконується автоматично без участі людини-оператора. Проблема оголошується та пізніше фіксується обслуговуючим персоналом.

3.1.3 Векторний електропривід ЗС

Найбільш значною характеристикою векторного електроприводу ЗС є те, що, можливий повний внутрішній контур керування силою струму електродвигуна ЗС, що неможливо зробити в традиційному електроприводі ЗС змінної частоти.

Даний аспект керування означає, що якщо пропускна здатність висока (як у більшості хороших векторних електроприводів), доступна схема керування положенням за стандартним АД. Векторні електроприводи зазвичай використовують в конструкції діодний міст із повною хвилею, проміжний банк зберігання ємності та зовні секцію вихідної потужності, використовуючи або GTOs, або біполярні транзистори потужності чи польові транзистори. Усі три конструкції - це високошвидкісні пристрої перемикання потужності, які можуть вмикатися і вимикатися (комутуватися) за бажанням.

Контролер використовує дані пристрої в режимі ШІМ регулювання величини напруги. Практично всі векторні електроприводи вимагають того, щоб кодувальник або тахогенератор було додано до АД з метою визначення величини проковзування ротора [9-13, 24, 25].

Можна запустити АД без давача зворотного зв'язку, але в результаті

будуть дуже жорсткі динамічні характеристики, зайняття позиції близько нульової швидкості неможливе і точний діапазон швидкостей знижується до 30 до 1 від базових доступних 100 до 1.

Векторне керування дає змогу керувати АД таким чином, що продуктивність достатньо висока, як у (або ще краща в деяких випадках) будь-якого типу щіткових електродвигунів ПС загального призначення. Оскільки відношення крутного моменту до інерції АД краще, ніж у щіткових електродвигунів ПС, існує потенціал для дуже високих швидкостей розгону/гальмування.

АД, однак, володіє однією характеристикою, яка обмежує ефективність векторного електродвигуна в деяких застосуваннях.

Звичайний електродвигун ЗС навіть із суттєвими змінами не може працювати безперервно при повному крутному моменті за дуже низьких швидкостей обертання через теплові втрати, спричинені проковзуванням. Жоден із електродвигунів не забезпечить діапазони швидкостей понад 10 до 1 (робота від повної швидкості до однієї десятої повної швидкості обертання) безперервно при повному крутному моменті через дане обмеження [9-13, 24, 25].

3.1.4 Безщіткові ЕПС

Безщіткові ЕПС, наприклад, з постійними магнітами та електродвигуни з комутованим магнітним опором, залежать від електронних систем приводу, які створюють магнітні поля, що обертаються [9-13, 24, 25]. Поява нових магнітних матеріалів, таких як сплави неодиму із високим рівнем магнітного насичення та високою коерцитивністю, здатних створювати та підтримувати досить високі магнітні поля, надали можливість створити низку інноваційних конструкцій безщіткового ЕПС, усуваючи один набір обмоток традиційного електродвигуна, статора або ротора [9-13, 24, 25].

Реалізація багатьох безщіткових конструкцій стала можливою лише завдяки наявності недорогих комутаційних напівпровідників високої

потужності, які дозволили радикально нові рішення проблеми комутації та значно спрощені механічні конструкції електродвигунів.

Характеристики швидкості обертання та крутного моменту безщіткових ЕПС дуже схожі на щітковий ЕПС із паралельним постійним збудженням. Також як у щіткових ЕПС магніти, що обертаються, створюють електрорушійну силу (ЕРС) в обмотках статора. Коли ЕПС живлять трифазною хвилею із негативними та позитивними імпульсами тривалістю 120 градусів, зворотна ЕРС або хвиля потоку буде мати трапецеїдальну форму.

3.2 Підбір апаратної частини

Важливою перевагою електродвигунів серій безконтактних моментних (БМЕ) та БМЕВ є можливість їх використання в прямих ПС, а якій ротор електродвигуна з'єднується безпосередньо з об'єктом керування (ОК) без додаткових механічних передач.

Основна перевага прямих ПС - це можливість підвищення кінцевої точності за рахунок відсутності люфтів, підвищення резонансної частоти, істотного зменшення мертвого ходу, зниження моментів сухого тертя та інших небажаних чинників, що вносяться використанням редуктору. Крім того, відсутність редуктора дає змогу забезпечити тривале сканування з високою частотою, стрибкоподібні крокові рухи та інші спеціальні режими роботи, що вимагають від ПС частих реверсів та високих прискорень [9-13, 24, 25].

Основні переваги прямого ПС на базі БМЕ вбудованого виконання наступні:

- забезпечення будь-якої плавної та низької швидкості обертання головного валу;
- відсутність в конструкції редуктора і пов'язаних із ним явищ нежорсткості та зносу;
- безшумна робота всіх частин ПС;

- можливість коаксіального встановлення декількох електродвигунів для підвищення крутного моменту;
- можливість передачі руху в герметичні або ізольовані обсяги або посудини;
- усі сигнали зворотного зв'язку ПС (за кутом і за швидкістю обертання) повинні бути сформовані наприклад, одним давачем положення (енкодером);
- лінійність механічних характеристик (МХ) та швидка реакція.
- забезпечення будь-яких режимів руху (стеження, перевантаження, частий реверс, сканування тощо);
- довгий термін служби 20-50 тис. год. у найважчих умовах використання.

Відсутність редуктора в конструкції не усуває пружних деформацій корпусу та підшипників ОК, однак дає змогу прямій ПС на практиці досягнення найвищої точності стеження (одиниці та частки кутових секунд).

Додатковими перевагами використання БМП є наступні:

- об'єднання в конструкції хороших регульовальних властивостей колекторних ЕМ ПС та безконтактності ЕМ ЗС;
- можливість роботи у важких умовах та значно довший термін служби порівняно з колекторними електродвигунами;
- гарні умови охолодження обмотки якоря, розташованої на статорі електродвигуна;
- БМП істотно відрізняється від традиційних видів електроприводів завдяки комплексній реалізації в ньому принципів модульності побудови, вбудовуваності, програмованості параметрів, безконтактності, різноманітності умов експлуатації та багатофункціональності.

Виберемо новий моментний електродвигун серії БМЕ та схему його керування для СК швидкістю ПС ПР відповідно до наступних вимог ТЗ, наведених у Таблиці В.1 (див. Додаток В).

Вибір БМЕ під час проектування БМП має певну специфіку, що відрізняється від підбору традиційних електродвигунів.

Розрахунок БМП доцільно виконувати в наступній послідовності: вибір типо-номіналу електродвигуна та схеми його керування; проектування ПК і ПП; виконання розрахунку тепловідведення.

1. Вибір ПС завжди починається з вирішення питання про доцільність застосування редукторної або безредукторної ПС.

Основним чинником є необхідна точність СК, яка для систем, що стежать, оцінюється за допомогою критерію Міллера:

$$\delta \geq 2 \cdot M_x, \quad (3.1)$$

де δ - максимальне значення досяжної динамічної помилки; M_x - мертвий хід механічної передачі (редуктора) між електродвигуном та давачем кута головного зворотного зв'язку.

Досвід показує, що в безредукторних (або прямих) ПС можливо досягти значення M_x механічної передачі щонайменше у п'ять разів нижче за значення, яке можна отримати для силових редукторів серійного виробництва із урахуванням умов використання. В відповідно до вимог ТЗ, розрахунки слід виконувати для прямої ПС.

2 Вибір типо-номіналу електродвигуна безредукторної ПС виконується за необхідним моментом M_n , який знаходиться за заданим коефіцієнтом лінійності (плавності) K_{sm} , що відображає допустиму зону нечутливості регульовальної характеристики:

$$K_{sm} = \frac{M_n}{M_{st}} = 3 \div 20 = 15, \quad (3.2)$$

Де M_{st} - максимальний статичний момент (тертя, небаланс тощо), приведений до електродвигуна, в усіх умовах використання.

Мінімальне значення даного коефіцієнта вибирається для грубих СК, а максимальне - для особливо точних СК.

Якщо враховувати коефіцієнт лінійності необхідний пусковий момент визначається з наступних умов:

$$M_s \geq K_{sm} \cdot M_{st}; M_s \geq 15; \quad (3.3)$$

$$M_s \geq M_{st} + (J_L + J_R) \cdot \varepsilon \cdot M_s = M_{st} + (J_L + J_R) \cdot \varepsilon;$$

$$M_s \geq 1 + 0,053 \cdot 18,85;$$

$$M_s \geq 1,999.$$

де J_L, J_R - моменти інерції ОК (навантаження) і ротора електродвигуна відповідно; ε - максимальне прискорення ОК, приведене до головного валу електродвигуна.

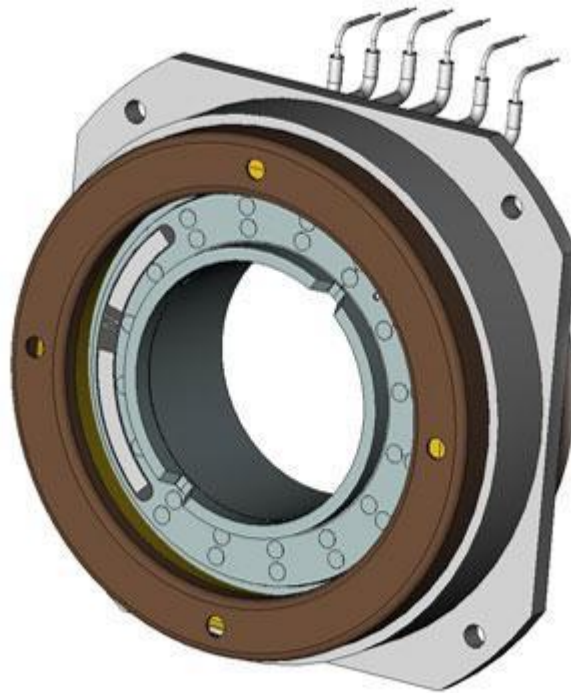


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд БМЕ серії 150-4-0,6-2 [24, 25]

Враховуючи величину M_n за таблицями параметрів електродвигунів та загальною методикою [9-13, 24, 25] встановлюємо, що за базової схеми найбільш близьким електродвигуном є БМЕ серії 150-4-0,6-2, параметри якого представлено в Таблиці В.2 (Додаток В).

Виконаємо детальний розрахунок БМЕ 150-4-0,6-2 ($M_s = 16,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$) за базовою СК. Відповідно до відомих методик виконується обчислення еквівалентного (середньоквадратичного) моменту електродвигуна, що залежить від величини задаючого впливу. Для гармонійного задаючого впливу даний момент обчислюється згідно із наступним виразом [29-31]:

$$M_{екв} = \sqrt{\left(\frac{M_{\Omega}}{i \cdot \eta} + M_{st}\right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \left(J_{\Sigma} \cdot \varepsilon\right)^2}; \quad (3.4)$$

$$M_{екв} = \sqrt{\left(\frac{1}{1} + 0,1\right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \left(0,053 \cdot 18,85\right)^2} = 1,31 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При обчисленні прийнято наступні значення $M_s = 0,1 \cdot M_n$, де $M_{ном} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ - номінальний крутний момент електродвигуна.

Далі визначимо величину моменту інерції ОК (навантаження) згідно формули:

$$J_{\Sigma} = 1,1 \cdot J_R + \frac{J_L}{t^2}; \quad (3.5)$$

$$J_L = J_{\Sigma} - 1,1 \cdot J_R = 0,053 - 1,1 \cdot 0,003 = 49,7 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

де $P_{e.l.}$ - величина втрат в міді при пусковому режимі від основної

гармоніки фазної сили струму.

Для двофазних електродвигунів серії БМЕ визначається згідно формули:

$$P_{e.l.} = k_e \cdot k_R \cdot I_{u.s.}^2 \cdot R_0, \quad (3.6)$$

де k_e - коефіцієнт, що залежить від числа секцій (фаз) та схеми їх підключення з врахуванням збільшення втрат обмотки статора внаслідок одночасного ввімкнення декількох фаз, приймаємо $k_e = 1$; k_R - коефіцієнт, що зв'язує загальний активний опір ланцюга, під'єданого до ПП, з опором секції обмотки статора $R_0 = 0,31$ Ом, приймаємо $k_R = 2$; $I_{u.s.}$ - величина пускового струму, що протікає через підсилювач потужності, $I_{u.s.} = 43,5$ А.

Етап вибору ППП починається із вибору ПК. Схема фазочутливого випрямляча (ФЧВ) для аналогового ПК залежить від частоти обертання головного валу.

За високої частоти обертання валу електродвигуна, що визначається згідно із формулою:

$$T_{fl} = \frac{1}{3 \cdot \delta \cdot U_{pk} \cdot \omega_e}; \quad (3.7)$$

$$T_{fl} = \frac{1}{3 \cdot 12,56 \cdot 0,2} = 0,13 \text{ мс};$$

$$P_{es}^* = \frac{P_{es}}{P_{ep}} = (p_p \cdot \Omega)^2 \cdot T_e^2, \quad (3.8)$$

де p_p - число пар полюсів синхронної машини; T_e - вимірюється в секундах, (електромагнітна постійна часу фази), а n в об/хв, менші втрати в

обмотці статора забезпечуються використанням ФЧВ із фільтром нижніх частот. Визначимо параметри ФЧВ [29-31].

Задавши допустиме значення відносної амплітуди пульсації величини вихідної напруги (віднесеної до амплітуди середнього значення даної напруги 0,2 та номінальною частотою збудження 12566 1/с (або 2000 Гц), обчислимо сталу часу фільтра:

$$P_{eh}^* = 0,04.$$

Після цього будемо визначати додаткові втрати в статорній обмотці.

Втрати від квадратурної сили струму, спричинені запізнюванням у ППП, розраховують згідно із наступною формулою:

$$P_{eh}^* = \frac{P_{eh}}{P_{ep}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{\delta U_{rt}^2}{1 + T_m^2 \cdot \omega_{rt}^2}; \quad (3.9)$$

$$P_{eh}^* = \frac{0,04}{1 + (1 + 1420,9)} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ Вт.}$$

За гармонійного задаючого впливу можна прийняти значення еквівалентної (середньоквадратичної) кутової швидкості ротора на рівні:

$$\Omega = \Omega_{екв} = \frac{\Omega_r}{\sqrt{2}} \cdot T_e = T_{fl} = 0,13 \text{ мс};$$

$$\Omega_{NL} = \frac{U_{dc}}{k_e \cdot C_E} = 54 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\Omega_r = \frac{\Omega_{NL} \cdot (k_{pl} - 1)}{k_{pl}} = \frac{54 \cdot 14}{15} = 50,4 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\Omega_{екв} = \frac{\Omega_r}{\sqrt{2}} = \frac{50,4}{\sqrt{2}} = 35,64 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$P_{es} = (8 \cdot 35,64 \cdot 0,13)^2 \cdot 1173,2 = 1,61 \text{ Вт.}$$

Потужність втрат в обмотці від вищих гармонік будемо визначати згідно із формулою:

$$P_{eh}^* = 0,04 \cdot P_{ep} = 0,04 \cdot 1173,2 = 46,93 \text{ Вт.} \quad (3.10)$$

де $\delta U_r = \delta U_{pk}$ та $\omega_r = 2 \cdot \omega_v$ - відносна амплітуда та частота кожної зі складових гармонік.

Вищі гармоніки фазної сили струму утворюються за рахунок пульсацій на виходах ФЧВ та ШПП, нелінійності характеристик вузлів ППП, відхилень від синусоїдальності вихідних величин напруги та ЕРС обертання синхронної машини, перешкод у каналах керування тощо.

Сумарні додаткові втрати в статорній обмотці важко зробити нижчими за значення в діапазоні 0,03-0,05. Таким чином, повні електричні втрати в статорній обмотці будуть рівні:

$$P_e = P_{es} + P_{est} = 7,58 + 1,61 = 9,2 \text{ Вт.}$$

Прийmemo величину температуру нагрівання обмотки електродвигуна на рівні $T_\omega = 120^\circ \text{C}$. Знайдемо величину допустимої температури статора електродвигуна T_{st} та необхідний тепловий опір радіатора:

$$T_{st} = T_{\omega} - R_T \cdot P_e;$$

$$R_T + R_p = \frac{(T_{st} - T_{en})}{P_e},$$

де R_T - тепловий опір статора [9-13], T_{en} - величина максимальної температури навколишнього середовища.

$$T_{st} = 120 - 0,2 \cdot 9,2 = 118,2^{\circ}\text{C};$$

$$R_T + R_p = \frac{(118,2 - 60)}{9,2} = 6,32 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}.$$

Для захисту від перегріву доцільно виконати монтаж теплового реле із температурою спрацьовування в діапазоні від 115 до 120 $^{\circ}\text{C}$.

Після ПК виконують підбір ПП, тип яких залежить зазвичай від величини механічної потужності БМП.

Потужність, споживана БМП, визначається згідно формули:

$$P_{\Sigma} = \left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot U_{dc} \sqrt{\frac{(P_{es} + P_{est})}{k_R \cdot R_0}}; \quad (3.11)$$

$$P_{\Sigma} = \left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot 27 \sqrt{\frac{(1,61 + 7,58)}{0,62}} = 132 \text{ Вт},$$

тоді еквівалентна механічна потужність буде рівною:

$$P_T = \frac{P_{\Sigma} - P_{eq} - P_{es} - P_{est}}{n_T}, \quad (3.12)$$

де n_T - загальне число силових транзисторів, при базовій СК з мостовими підсилювачами потужності [9-13], $n_T = 8$.

$$P_T = \frac{132 - 39,2 - 7,58 - 1,61}{8} = 10,45 \text{ Вт.}$$

3.3 Розробка алгоритмів керування безконтактним моментним приводом

Привід ЕПС доволі простий у реалізації порівняно з приводом ЕЗС. ЕПС можуть керуватися безпосередньо за допомогою відношення напруга-частота (V/F); тобто чим вища рівень прикладеної напруги, тим вища частота або швидкість обертання. Така ПС зазвичай реалізується в щіткових ЕПС.

Для приводів ЕЗС і деяких електроприводів, де PLC перетворює ПС у змінний для керування електродвигуном (наприклад, як BLDC або PMSM), для комутації котушок у послідовності використовуються складні алгоритми руху для досягнення бажаного напрямку обертання головного валу. Швидкість, з якою комутуються обмотки, пропорційна швидкості, з якою працює електродвигун. Доступні наступні алгоритми керування електроприводом:

- трапецеїдальне керування - або шести ступінчасте керування, відоме, як найпростіший алгоритм. Для кожного з шести кроків комутації між парою обмоток формується струмовий ланцюг, в результаті чого третя обмотка відключається. Цей метод генерує достатньо високий момент пульсації, що призводить до шуму, вібрації та загального сповільнення роботи ПС порівняно з іншими алгоритмами керування.

- синусоїдальне керування - дає можливість усунути багато небажаних явищ трапецеїдального керування, плавно постачаючи (синусоїдальний) ЗС на

всі три обмотки, тим самим зменшуючи пульсації крутного моменту і забезпечуючи плавне обертання валу. Однак, ці струми, що є змінними в часі, керуються за допомогою використання ПІ регуляторів, які призводять до зниження продуктивності [32-38];

- замкнуті системи скалярного керування - СК містить давач положення, який використовується для вимірювання швидкості обертання. У давачі може бути використаний або давач Холла, або тахометр. Таймер із тригером захвату вхідних сигналів забезпечує проведення двох паралельних вимірювань: часу між захватом двох сигналів та зміни положення ротора, за допомогою якої можна визначити швидкість обертання електродвигуна.

Швидкість обертання ротора обчислюється шляхом зміни його положення, визначеного за даними, отриманими з двох сусідніх затискачів давача положення.

Даний алгоритм керування забезпечує точне керування швидкістю обертання під час прискорення і гальмування електродвигуна, тому багато фахівців рекомендують використовувати саме його.

Проте, використання ПД-регулятор має серйозні недоліки. Операція диференціювання із шумним сигналом підвищує перешкоди і виникає нестійкість ПД-регулятора. Зазвичай диференціальна складова визначає перехідні процеси, тому вона може бути ввімкнена тільки під час зміни завдання швидкості обертання.

- Field Oriented Control (FOC) або керування, орієнтоване за полем, відоме як векторне керування, FOC забезпечує більшу високу ефективність на більш високих швидкостях, ніж синусоїдальне керування. Також такий тип керування гарантує оптимізовану ефективність навіть під час перехідного процесу шляхом відмінного підтримання потоків статора та ротора. FOC також надає кращу продуктивність у зміні динамічних навантажень порівняно з усіма іншими алгоритмами.

Основна ідея векторного алгоритму керування - керування не тільки

величиною напруги живлення та частоти, а й фази. Іншими словами, керуються величина та кут просторового вектора [32-38]. Векторний алгоритм керування дає можливість регулювати швидкість обертання та крутний момент на валу електродвигуна незалежно та практично без інерції. Векторний алгоритм керування порівняно зі скалярним алгоритмом забезпечує більш високу продуктивність. Векторний алгоритм керування усуває практично всі недоліки скалярного алгоритму керування.

Переваги векторного алгоритму керування:

- висока точність керування швидкістю обертання;
- збільшення діапазону регулювання і точності;
- швидке реагування на зміну навантаження: при зміні навантаження практично немає зміни швидкості обертання;
- плавний пуск і плавне обертання валу електродвигуна в усьому діапазоні частот;
- зниження теплових втрат і намагніченості, збільшується ККД електродвигуна.

До недоліків векторного алгоритму керування відносять:

- великі коливання швидкості за постійного навантаження;
- необхідність завдання параметрів електродвигуна;
- висока складність обчислювання.

Існує кілька типів векторного алгоритму керування. Найбільш широко використовують DTC (або Direct torque control – пряме керування крутним моментом) і FOC (або Field Oriented Control - керування за допомогою поля).

Пряме керування крутним моментом DTC - було запроваджено компанією АВВ. Даний тип керування має наступні переваги:

- простота керування;
- хороша динаміка;
- не потребує давача положення (керування без давачів).

Класичний тип схеми керування DTC набагато простіший, ніж тип FOC,

оскільки не потребує виконання перетворення системи координат та вимірювання швидкості обертання та положення.

Схема DTC має крутний момент і обчислювач поля статора, гістерезисний момент і польові компаратори, таблицю перемикання та інвертор. Виміряні крутний момент і значення поля порівнюються із заданими значеннями за допомогою гістерезисного компаратора, а вихідний сигнал від компаратора подається на таблицю комутації, щоб підібрати відповідний вектор напруги в кожному періоді вибірки.

Недоліком класичного типу DTC є наявність великої сили струму та крутного моменту пульсацій у сталому стані. Дана проблема усувається шляхом збільшення робочої частоти інвертора вище рівня в 40 кГц, що збільшує загальну вартість СК.

FOC - метою векторного керування за полем є керування синхронним електродвигуном з постійними магнітами (PMSM) як роздільно збудженої ЕМПС, що означає, що полем та крутним моментом можна керувати окремо. Значення величин миттєвих струмів статора перетворюються в обертову систему координат dq за допомогою математичних рівнянь та інформації про положення ротора.

Величина сили струму поля керується через вісь d , у той час як крутний момент керується силою струму через вісь q . Для досягнення роздільного керування полем і крутним моментом недостатньо використовувати лише перетворення dq , оскільки існує зв'язок між двома осями, який може бути збалансовано шляхом віднімання з величини опорної напруги на dq осях відповідних сполучних елементів.

Для PMSM є два типи керування вектором на полі: роторно-орієнтоване керування та керування, орієнтоване за статором [32-38].

В нашій кваліфікаційній роботі використовується метод векторного керування вентилювальним двигуном ПС. Результати моделювання представлено в другому розділі, де наведені функціональні діаграми векторного керування.

3.4 Висновки до третього розділу

Аналіз ТЗ показав, що в досліджуваному приводі ПР доцільно використовувати СМЕД із постійними магнітами на роторі за використання векторного методу керування.

Тому для забезпечення вимог ТЗ ми обрали БМЕ серії 150-4-0,6-2 за базовою схемою керування з пусковим моментом на рівні 16,3 Н*м. Для захисту від перегрівання статорної обмотки вище рівня 120 °С доцільно встановити статор ЕД в корпус із радіатором, що має тепловий опір не вище рівня 6,32 °С/Вт, а також вмонтувати в конструкцію теплове реле з температурою спрацьовування в діапазоні від 115 до 120 °С.

Під час проєктування ПК доцільно використовувати давач положення ротора у вигляді обертового трансформатора (наприклад, типу ВТ 120) і вибрати ФЗВ із фільтром нижніх частот (із сталою часу не більше 0,13 мс), що забезпечує при високій частоті обертання валу ЕД до 690 об/хв менші втрати в статорній обмотці.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

Створюючи СК, нам потрібно витратити багато часу на пошуки необхідних компонентів у каталогах багатьох фірм. Навіть порівняно невелика СК потребує досить великої кількості рекомендованих, обраних та, відповідно, замовлених елементів найпростішої СК, наприклад із використанням стандартної релейної логіки. Реле, базові реле, таймери, кінцеві вимикачі, дроти, кабельні канали, сигнальні лампи, кнопки та, звичайно, корпус для виконання монтажу. Це лише невелика частина того, що необхідно, щоб почати створювати проєкт.

За допомогою PLC або його наступника - програмованого контролера автоматизації (РАС) це завдання стає трохи простішим. Дані пристрої поєднують у собі функції різних продуктів та можуть бути застосовані в більшості розвинених СК.

Сфери використання PLC повною мірою відображає застосування в галузі систем автоматизації технологічних процесів та виробництв. Як і очікувалося, керування машиною займає найпоширеніше місце у сфері використання - 82%. Керування ТП - 74%, керування рухом робочого органу - 55%, контроль партії - 31%, діагностичні програми, лише - 25%. Найменш імовірним є використання PLC для забезпечення загальної безпеки виробництва - 1%, а і тут є суттєвий ріст [39-45].

Способи взаємозв'язку з іншими СК займають одне із головних місць в гнучкості сучасного PLC. Згідно результатів досліджень, мережеві протоколи використовуються в 69% від всіх встановлених PLC, інші 31% використовуються в якості самостійних пристроїв.

Більшість із них підключені до мережі PLC, обмінюються інформацією з РАС та персональними комп'ютерами на автоматизованих робочих місцях і стільки ж пов'язані з іншими PLC. Трохи більше ніж 5% PLC знайшли

застосування в розподілених СК [39-45].

Мережеві протоколи PLC забезпечують достатньо високу гнучкість будь-якої СК. Незважаючи на те, що є явні фаворити, наприклад, Ethernet, або серійний RS232 чи RS-485 із діапазоном від 4 до 20 мА, список доступних мережевих протоколів набагато різноманітніший:

- Wireless protocol;
- Allen-Bradley Remote I/O;
- HART;
- ControlNet;
- Profibus;
- Modbus.

У PLC можуть бути використані різні мови програмування, але дослідження показали чіткі переваги. Релейно-контактні схеми або LD (LAD) (96%) та функціональні блоки або FBD (50%) очолили список використовуваних мов програмування.

Очевидно, що змістити LD (LAD) із верхнього рядка списку буде дуже складно, але програмування з використанням графічної мови FBD досягло великих успіхів протягом останніх років [46].

4.1 Особливості вибору елементів керування силової частини електроприводом ПР

У той час як ринок PLC та PAC є досить розвинутим, він продовжує заново винаходити сам себе.

Загальний розвиток ринку PLC та PAC прив'язаний до минулих трендів, але існують відібрані регіональні та вертикальні ринки PLC та PAC, які зростають на рівні, вищому за середньої швидкості зростання. Регіональний розвиток досить суттєво пов'язаний із загальними економічними показниками. Зростання на вертикальних ринках PLC та PAC також залежить від

технологічного розвитку; в той час як деякі вертикалі зрілі, збільшення продуктивності також дає змогу PAC ввести більше додатків в промисловість обробки.

За останні роки розвитку автоматизації технологічних процесів та виробництв інтегрована безпека стала ключовим фактором і є одним з найбільш важливих питань для PLC, зростає кількість функцій, інтегрованих у платформи PLC та PAC. Інтеграція полегшує життя не тільки для кінцевих користувачів, а і для OEM-виробників та є досить суттєвою конкурентною перевагою.



Рисунок 4.1 – Типи PLC та PAC [39-45]

Явна тенденція полягає в інтеграції кібербезпеки безпосередньо в платформу PLC. Це робить PLC платформою для практично всього нижчого шару CRM.

У той час, як нові можливості пропонують диференціювання, очікується

досить суттєву зростання конкуренції. Протягом минулої кризи нові учасники з ринків, що розвиваються, отримали частку ринку в країнах з розвиненою економікою, оскільки зросла чутливість цін. Крім того, багато компаній-виробників розширили свої сфери автоматизації, орієнтовані на керування приводом або рухом робочого органу, додавши PLC [39-45].

Представлено список основних постачальників PLC по мірі поширення на ринку: - Siemens; - ABB; - Schneider Electric (Modicon); - Rockwell (Allen-Bradley); - Mitsubishi; - GE; - Omron; - Bosch Rexroth; - Beckhoff [39-45].

Частки ринку фірм-виробників у різних географічних регіонах досить суттєво відрізняються. Наприклад, поділ промисловості Siemens (зокрема систем автоматизації та SCADA) мав більше 50% своїх доходів саме від європейських країн, у той час як Rockwell Automation виконує близько 50% своїх продажів в лише у США [47, 48].

Частка ринку для постачальників може значно варіюватися залежно не тільки від галузі, а також і від регіону. На північноамериканському ринку електроенергетики, наприклад, компанія Schneider Electric є постачальником PLC із часткою ринку приблизно 45%, потім Rockwell Automation – близько 30%, Cutler Hammer, майже 10% та інші – цілих 17% [47-49].

4.2 Аналітичні дослідження елементів керування силової частини електроприводом ПР

З урахуванням характеристик проєктованої СК швидкістю обертання та обраного типу ВЕД, виберемо PLC, на якому буде реалізовано дану СК.

Загально відомо, що діапазон постачальників PLC великий і багато хто пропонує низку альтернативних продуктів із будь-якою кількістю модулів та вбудованих особливостей.

Наш вибір повинен відповідати усім вимогам застосування та технічного завдання, забезпечити додатковий потенціал для майбутнього розвитку та надати

економічне рішення.

Ціна є найпоширенішою причиною вибору обладнання, але справжня ціна PLC, що відповідає вимогам конкретного використання, часто майже ідентична, тій яка і у широкого діапазону обладнання.

Остаточний вибір постачальника для створеної на базі PLC СК залежатиме від функціональності, доступності підтримки, знань користувача та кінцевої ціни. Існують декілька питань, які необхідно вирішити:

- функціональність або необхідність співвіднести вимоги додатка з особливостями обладнання кожного постачальника;
- підтримка: навчання; технічна підтримка (на місці монтажу або в телефонному режимі); прикладна підтримка для розробки СК та налаштування; швидкий обмін або ремонт обладнання, що відмовило; гарантована підтримка будь-якої встановленої продукції протягом неменше як 10 років з моменту придбання [39-45, 47-49].

З огляду на вказану інформацію, було прийнято рішення використовувати PLC від фірми Schneider Electric Corporate.

Критерії якими ми керувались при виборі PLC:

- вимоги до системи – по перше вихідною точкою у визначенні будь-якого рішення має бути розуміння того, що має бути досягнуто; по друге розробка будь-якої програми починається із розбиття завдання на декілька простих зрозумілих елементів, кожен з яких може бути легко математично описаний;
- вимоги додатків – або вимоги пристроїв вводу/виводу. Після визначення роботи СК, наступним кроком буде визначити, які входи та виходи потребує СК; список необхідних функцій та визначення конкретного типу пристрою; також потреба в спеціальних операціях на додаток до дискретної (вмикання/вимикання) логіки; перерахування розширених функцій;
- мінімально необхідна потужність вводу/виводу;
- необхідні типи входів/виходів;
- мінімально необхідний обсяг пам'яті;

- необхідна швидкість процесора;

- електричні вимоги - вимоги до входів, виходів та потужності СК. Під час визначення електричних вимог до СК розглянемо три наступні пункти: величина вхідної потужності (потужність для СК); рівень напруги пристрою вводу; величина вихідної напруги та сили струму;

- швидкість роботи - визначає, наскільки швидко має працювати СК (швидкість роботи). Під час визначення швидкості роботи, розглядаються наступні питання: у які терміни має відбуватися найшвидша дія (виявлення пристрою вводу й активація пристрою виводу); чи існують «критичні за часом» операції або надзвичайні події, які повинні бути виявлені; як швидко відбувається процес або працює машина; чи необхідно СК підраховувати імпульси від кодувальника та швидко реагувати;

- вимоги до засобів зв'язку - якщо додаток вимагає спільного використання даних поза ТП. Зв'язок включає обмін даними ТП додатків або статусом з іншим електронним пристроєм, таким як ПК або монітор на АРМ оператора. Зв'язок може здійснюватися локально через виту пару або віддалено;

- ПЗ;

- інтерфейс оператора - якщо СК потребує керування людиною-оператором або взаємодії. Для того, щоб передати інформацію про машину або стан ТП, або щоб дозволити людині-оператору вводити дані, багато додатки вимагають наявності інтерфейсу для оператора. Стандартні інтерфейси людини-оператора містять у собі кнопки, сигнальні лампи та світлодіодний цифровий дисплей. Електронні прилади інтерфейсу людини-оператора також можуть відображати повідомлення про стан апарата у вигляді тексту опису та відстежують сигнали тривоги. Крім того, вони можуть бути використані для вводу необхідних даних;

- фізичне середовище у якому буде розташована СК. У суворих умовах слід розмістити СК у відповідному ІР-захищеному корпусі. Важливо пам'ятати та врахувати простоту для технічного обслуговування, пошуку та усунення

несправностей або перепрограмування [47-49].

Провівши аналіз вказаних критеріїв, для реалізації СК швидкістю обертання було обрано інтелектуальне реле Zelio Logic SR2B121 BD від фірми виробника Schneider Electric (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Загальний вигляд реле Zelio Logic SR2B121 BD [49]

Інтелектуальні реле типу Zelio Logic мають поєднання досить хорошої ціни та простоти використання; забезпечують реальну альтернативу рішень, заснованих на релейній логіці та спеціалізованих картах. Дані інтелектуальні реле прості у виборі, монтажі та програмуванні. Zelio Logic підходить для СК швидкістю з ВД. Крім того, даний тип інтелектуального реле є гнучким і пропонує на вибір два різновиди - модульні версії, які дають можливість використовувати додаткові модулі розширення та дві мови програмування (LAD та FBD) або компактні версії з фіксованими конфігураціями [49].

Основні характеристики інтелектуального реле типу Zelio Logic SR2B121BD представлено в таблиці В.3, Додаток В.

Програмування на мові FBD полягає у використанні наперед створених функціональних блоків. Передбачається, так би мовити, візуальне програмування із використанням графічного редактора та графічних примітивів. Для цього у вікні вибору мови програмування (рис. 4.3) натиснути піктограму FBD і обрати мову програмування діаграм функціональних блоків.

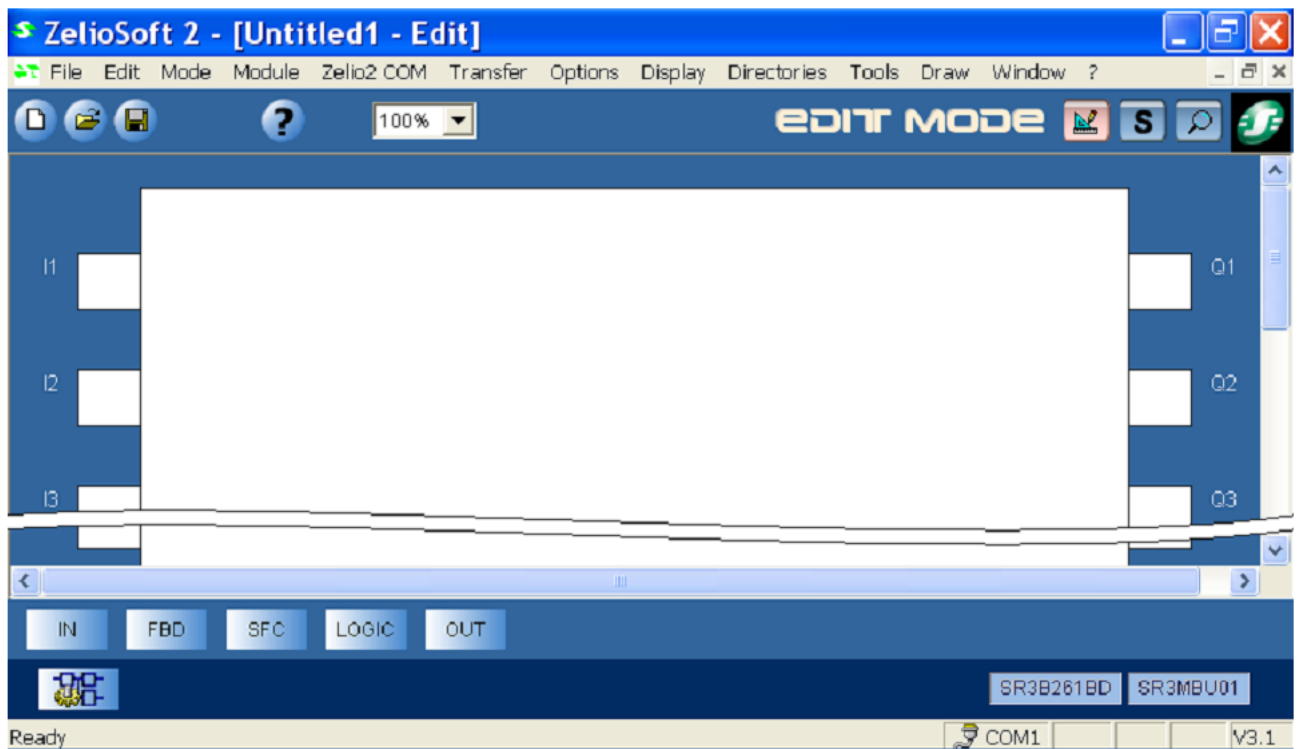


Рисунок 4.3 – Загальний вигляд головного вікна програмного середовища Zelio Soft 2 у режимі редагування програми на мові FBD

Рядок меню програмної оболонки Zelio Soft 2 у режимі програмування мовою FBD має майже такий самий перелік команд, що і у режимі програмування мовою LD. Відмінність складають команди, які призначені для набору та редагування програми такі як:

- Tools – інструменти: Align – вирівняти виділені графічні об’єкти (Align left – за лівим краєм, Align top – за верхнім краєм, Align bottom – за нижнім краєм, Align right – за правим краєм, Center object horizontally – центрувати уздовж горизонталі, Center object vertically – центрувати уздовж вертикалі); Distribute – розподілити рівномірно виділені графічні об’єкти (Distribute vertically – уздовж вертикалі, Distribute horizontally – уздовж горизонталі); Order – змінити план розташування графічного об’єкта (Send to back – перенести на задній план, Bring to front – розмістити на передньому плані,); Group – згрупувати виділені графічні об’єкти; Ungroup – розгрупувати графічний об’єкт; Renumber the links – перенумерувати зв’язки між блоками; Renumber the functions

– перенумерувати функціональні блоки; Wiring mode – режим позначення зв'язків між блоками (Wiring – лініями, Text – у вигляді тексту); Type of wiring – тип виділеного зв'язку (Wiring – лінією, Text – текстом, Modify the text... – перейменувати позначений зв'язок);

- Display – група команд керування графічним інтерфейсом програмного середовища ZelioSoft 2: Block number – керування відображенням порядкових номерів блоків (All – показати порядкові номери усіх блоків програми, None – сховати порядкові номери усіх блоків); Zoom – масштаб відображення програми користувача на екрані (25...150%); Grid – керування графічною сіткою, що призначена для вирівнювання графічних об'єктів по вертикалі та горизонталі на полі набору програми (Display the grid – показати/приховати сітку, Spacing – крок сітки: 12 px, 24 px, 36 px, 48 px);

- Draw – накреслити графічний об'єкт: Line – пряма; Rectangle – прямокутник; Ellipse – еліпс; Text – текстовий блок; Image – завантажити зображення із bmp-файлу; Width – товщина лінії абрису (Single line – одинарна, Double line – подвійна, Triple line – потрійна товщина); Border – показати/сховати абрис графічного об'єкта; Shape color – колір бордюру графічного об'єкта (Assign – зробити однаковим для виділених об'єктів, Choose – вибрати з палітри); Background color – колір заливки графічного об'єкта (Assign – зробити однаковим для виділених об'єктів, Choose – вибрати з палітри);

У режимі програмування мовою FBD розробнику доступні наступні види вікон:

- Supervision/Monitoring window – вікно супервізора/моніторингу;
- Edit window – вікно редагування програми.

Набір та редагування створеної програми виконується із використанням стандартних методів (у тому числі «Copy/Paste» та «Drag/Drop»), також функціонують стандартні «гарячі» комбінації клавіш «Ctrl + c» – копіювати, «Ctrl + x» – вирізати, «Ctrl + v» – вставити, «Ctrl + a» – вибрати все, тощо.

Окрім піктограм функціональних блоків на полі для набору програми

можна розміщувати графічні примітиви та завантажені із bmp-файлу зображення [49].

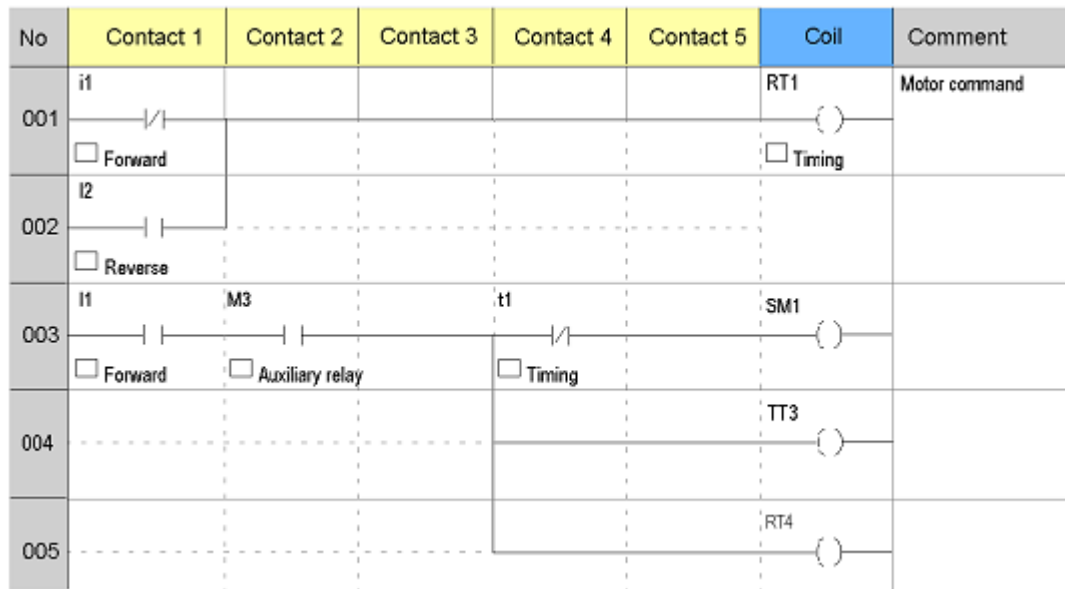


Рисунок 4.4 – Загальний вигляд головного вікна програмного середовища Zelio Soft 2 у режимі редагування програми на мові LAD

Програма, написана мовою LD, складається з мереж з'єднаних між собою елементів. Виконання програми відбувається згідно географічного розміщення елементів зверху донизу і зліва направо (рис. 4.4).

Графічні елементи [49] - входи-виходи контролера (кнопки, датчики, реле, світлові індикатори тощо); логічні операції; контакти функціональних блоків (таймерів, лічильників тощо); внутрішні перемінні (допоміжні реле) контролера.

Кожен рядок LD-програми складається із набору графічних елементів, які розміщені у прямокутниках сітки: максимальна кількість рядків – 120; кожен рядок може містити до п'яти контактів та одну котушку.

LD-діаграма поділена на дві зони (рис. 4.4):

- test zone, в якій розміщуються контакти;
- action zone, в якій розміщуються котушки (відображає результат операцій) [49].

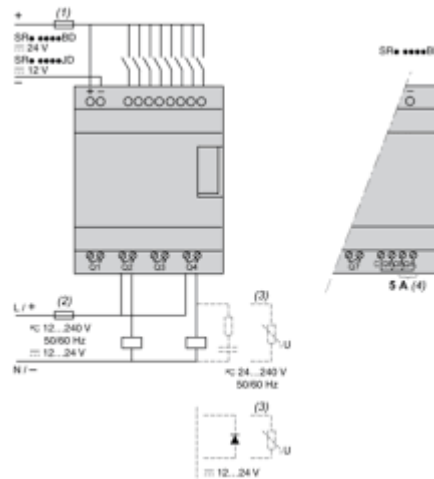


Рисунок 4.5 – Загальний вигляд приєднання джерела постійного струму до інтелектуального реле

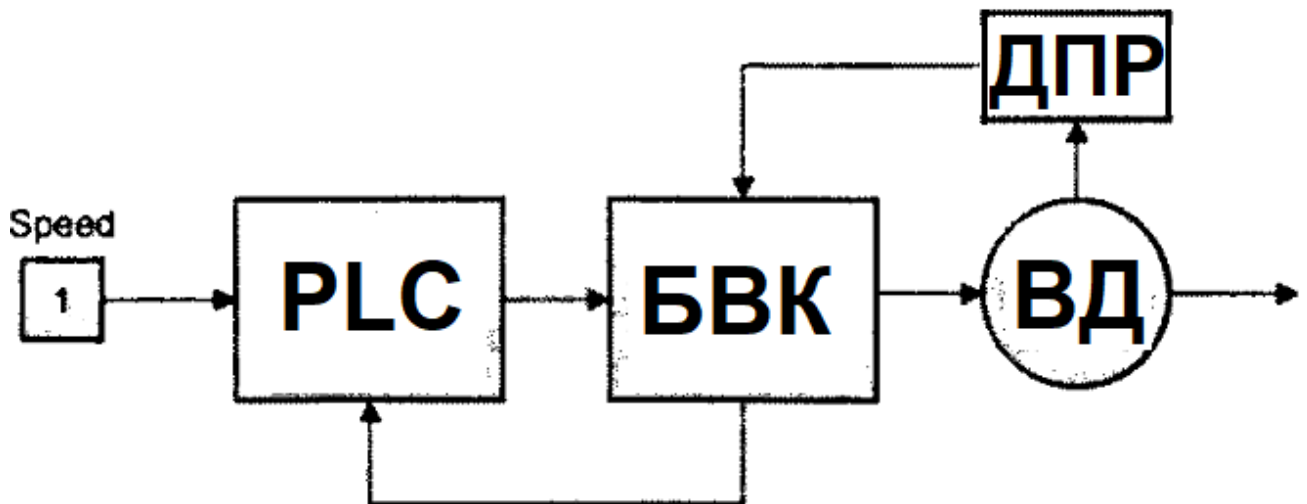


Рисунок 4.6 – Загальний вигляд функціональної схеми СК швидкістю обертання БМП

Функціональну схему СК швидкістю обертання БМП на основі PLC показано на рисунку 4.6, де PLC - програмований логічний контролер; БВК - блок векторного керування, що видає також і сигнал фактичної швидкості обертання електродвигуна, який вводять у вигляді зворотного зв'язку в PLC; ДПР - давач положення ротора (наприклад, ВТ 120); ВД – електродвигун типу БМЕ 150-4-0,6-2.

4.3 Висновки до четвертого розділу

Перехід до керування ПР на основі PLC дає наступні переваги такі як наявність загальних елементів програмування (ПЗ, кабелів тощо), інтерфейсів ПЗ, методології програмного резервного копіювання/відновлення та програмної документації. Програмування додатків ПР, використовуючи PLC допоможе заощадити час впровадження та гроші користувачів і знизити вартість ПР, водночас спрощуючи програмування ПР.

Керуючись такими критеріями, як функціональність, наявність технічної підтримки, знання користувача, ціна та характеристики БМЕ, для реалізації спроектованої СК швидкістю обертання було обрано інтелектуальне реле типу Zelio Logic SR2B121BD.

Також було розроблено функціональну схему СК швидкістю БМП на основі PLC.

ВИСНОВКИ

Виконано аналітичний огляд та аналіз існуючих технічних рішень приводних систем промислових роботів, описано основні принципи приводних систем. Розглянуто існуючу класифікацію систем керування рухом інструмента промислового роботу.

Описано принципи керування ПР на основі PLC, на базі чого виконано постановку завдань для автоматизації системи керування швидкістю безконтактного електроприводу ПР.

Відповідно до результатів розрахунків та моделювання СК швидкістю ВД, можна зробити наступні висновки:

- СК швидкістю ВД зі схемою векторного керування, функціональність якої було змодельовано в програмному пакеті MATLAB, може ефективно компенсувати вплив постійних часу, що призводить до МХ ВД, близьких до ідеальних.

- векторне керування призводить до поліпшення динаміки всього приводу з ВД, що пояснюється підвищенням лінійності МХ електродвигуна.

- перехідні процеси СК швидкістю обертання БМП із обраними параметрами регуляторів контуру струму та швидкості задовольняють встановленим вимогам технічного завдання за показника коливальності $M = 1.52$, що не перевищує заданого значення показника $M = 1.7$;

- розроблена СК швидкістю БМП забезпечує величину падіння швидкості обертання ВД під час зростання номінального моменту навантаження в 7 разів меншу, ніж при використанні системи без схеми керування швидкістю обертання, що дає змогу підвищити якість роботи.

Аналіз ТЗ показав, що в досліджуваному приводі ПР доцільно використовувати СМЕД із постійними магнітами на роторі за використання векторного методу керування.

Тому для забезпечення вимог ТЗ ми обрали БМЕ серії 150-4-0,6-2 за

базовою схемою керування з пусковим моментом на рівні $16,3 \text{ Н*м}$. Для захисту від перегрівання статорної обмотки вище рівня $120 \text{ }^\circ\text{C}$ доцільно встановити статор ЕД в корпус із радіатором, що має тепловий опір не вище рівня $6,32 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$, а також вмонтувати в конструкцію теплове реле з температурою спрацьовування в діапазоні від 115 до $120 \text{ }^\circ\text{C}$.

Під час проєктування ПК доцільно використовувати давач положення ротора у вигляді обертового трансформатора (наприклад, типу ВТ 120) і вибрати ФЗВ із фільтром нижніх частот (із сталою часу не більше $0,13 \text{ мс}$), що забезпечує при високій частоті обертання валу ЕД до 690 об/хв менші втрати в статорній обмотці.

Перехід до керування ПР на основі PLC дає наступні переваги такі як наявність загальних елементів програмування (ПЗ, кабелів тощо), інтерфейсів ПЗ, методології програмного резервного копіювання/відновлення та програмної документації. Програмування додатків ПР, використовуючи PLC допоможе заощадити час впровадження та гроші користувачів і знизити вартість ПР, водночас спрощуючи програмування ПР.

Керуючись такими критеріями, як функціональність, наявність технічної підтримки, знання користувача, ціна та характеристики БМЕ, для реалізації спроектованої СК швидкістю обертання було обрано інтелектуальне реле типу Zelio Logic SR2B121BD.

Також було розроблено функціональну схему СК швидкістю БМП на основі PLC.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Павленко І.І., Мажара В.А. Роботизовані технологічні комплекси: Навчальний посібник. – Кіровоград: КНТУ, 2010. – 392 с.
2. Робототехнічні системи: проектування і моделювання [Електронний ресурс]: навч. Посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» / М. М. Поліщук, М.М. Ткач; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 41,6 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. - 112 с.
3. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. Springer Heidelberg, New York, 2012. - 178p.
4. Auke Ijspeert, Carlo Menon. Modelisation and Simulation of Climbing Robots. Master Project, Simon Ruffieux, Simon Fraser University, 2008.- 21p.
5. Проектування промислових роботів та маніпуляторів: Навчальний посібник / Ковальов Ю.А., Кошель С.О., Манойленко О.П.. — К.: ЦУЛ, 2021. — 256 с.. — (МОН України. КНУ технологій та дизайну). — ISBN 978-611-01-1690-9
6. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні / [Л.Є.Пелевін, К. І. Почка, О. М. Гаркавенко та ін.]. – К.: Інтерсервіс, 2016. – 258 с.
7. Основи мехатроніки [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С. М. Пересада, М. В. Пушкар. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,87 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 137 с.
8. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Човнюк Ю.В. Мехатроніка. Навчальний посібник. – К., 2012. - 357 с.
9. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму: [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря

Сікорського ; уклад.: В.М. Пижов, Н.Д. Красношарпа, М.Я. Островецьков.– Електронні текстові дані (1 файл: 2,48 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 198 с. (доступ за посиланням <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41950>)

10. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.

11. Electrical Drives. Principles-Planning-Applications-Solutions. Jens Weidauer, Richard Messer / Siemens, 2015. – 397 p., англійською мовою.

12. Островецьков, М. Я. Електричні машини та електропривод [Електронний ресурс]: розрахункова робота для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Автоматизація хіміко-технологічних процесів і виробництв» / М. Я. Островецьков ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 466,01 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 76 с. (доступ за посиланням <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22742>)

13. Автоматизований електропривод ч. 2 [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В.І. Теряєв. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 204 с.

14. Перший промисловий робот Unimate [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<https://electricalschool.info/robot/2724-istoriya-pervogo-promyshlennogo-robota-unimate.html>

15. Robot Drive Systems [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<http://www.roboticsbible.com/robot-drive-systems.html>

16. Мембранні та пневматичні приводи [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<https://www.festo.com/ua/uk/c/produkti/avtomatizatsiia->

virobnitstva/privodi/pnievmatichni-privodi/miembranni-ta-pnievmatichni-privodi-id_pim222/

17. Кучерук В.Ю. Програмування логічних контролерів Schneider Electric. Навчальний посібник / В.Ю. Кучерук, В.О. Поджаренко, П.І. Кулаков – В.: ВДТУ, 2001. - 134 с.

18. Куцик А.С. Автоматизовані системи керування на програмованих логічних контролерах. Навчальний посібник/ Куцик А.С., Місюренко В.О. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. - 200 с.

19. Programmable Logic Controller (SIEMENS S7-1500) / Khazarov V.G.//Automation Studio.- 2017.-V3.- P.21-32.

20. Programmable logic controller [Електронний ресурс] – Режим доступу:
http://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Programmable_logic_controller.html

21. About Programmable Logic Controllers [Електронний ресурс] – Режим доступу:

http://www.ehow.com/about_4759671_programmable-logic-controllers.html;

22. Micrologix 1000 фірми Allen Bradley [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<https://pe-ko.com.ua/uk/allen-bbradley28>

23. The Types of PLCs [Електронний ресурс] – Режим доступу:

http://www.ehow.com/list_6372341_types-plcs.html;

24. Кевшин А. Г., Федосов С. А, Галян В. В. Електричні машини : конспект лекцій. Луцьк, 2020. - 62 с.

25. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с. ISBN 978-617-7541-11-9

26. Matlab Documentation. [Електронний ресурс] - Режим доступу: -
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>

27. Getting Started with MATLAB. Version 6.5. The MathWorks, Inc., 2002.

28. Simulink Documentation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>
29. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.
30. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.
31. Ладанюк А. П., Архангельська К. С., Власенко Л. О. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами: Навч. посіб. / – К.: НУХТ, 2014. – 274 с.
32. Системи керування електроприводами. Видання 2: Навч. посібник з дисципліни «Системи керування електроприводами» (для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» денної і заочної форми навчання)/ – Краматорськ: ДДМА, 2018. – 225 с.
33. LEM – current transducer, voltage transducer, sensor, power measurement [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.lem.com/en>
34. Products - Micronor [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://micronor.com/>
35. Home - CALT Sensor [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://caltensor.com/>
36. Encoder manufacturer rotary incremental & absolute encoders company [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.encoder.com/>
37. Power modules and systems SEMIKRON [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<https://www.semikron.com/>

38. Semiconductor & system solutions - Infineon technologies [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<https://www.infineon.com/>

39. Шаповаленко В. А. Чисельні методи та моделювання на ЕОМ: Навчальний посібник. Модуль 1. / В. А. Шаповаленко, Л. М. Буката, О. Г. Трофименко. – Одеса : ВЦ ОНАЗ, 2010. – Ч. 1. – 95 с.

40. Лукінюк М.В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічний об'єкти керування та схеми автоматизації: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ют.-інтег. технології / М. В. Лукінюк. - К.: НТУУ «КПІ», 2008. - 236 с.

41. Гончаренко Б.М. Автоматизація виробничих процесів / Гончаренко Б.М., Осадчий С.І., Віхрова Л.Г., Каліч В.М., Дідик О.К. – Кіровоград: Видавець – Лисенко В.Ф., 2016. – 352 с.

42. Буката Л.Н. Чисельні методи та моделювання на ЕОМ: навчальний посібник. – Ч. 1. – Модуль 2 / Буката Л.Н., Глазунова Л.В. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2013. – 84 с.

43. Автоматизація виробничих процесів : підручник / І. В. Ельперін, О. М. Пупена, В.М. Сідлецький, С. М. Швед ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т харчових технологій. – Київ : Ліра-К, 2015, 2019. – 378 с.

44. В.М. Синєглазов Автоматизація технологічних процесів: Навчальний посібник / Синєглазов В.М., Сергєєв І.Ю. – К.: НАУ, 2010. – 506 с.

45. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: Навчальний посібник / Барало О.В., Самойленко П.Г., Гранат С.Є., Ковальов В.О. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 557 с. ISBN 978-966-2007-12-1.

46. IEC 61131-3:2013. Programmable controllers - Part 3: Programming languages, 2013. – 464 p.

47. Офіційний сайт ALLEN-BRADLEY [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/hardware/allen-bradley.html>

48. Офіційний сайт SIEMENS [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<https://www.siemens.com/ua/uk.html>

49. Schneider Electric Україна [Електронний ресурс] – Режим доступу:

<https://www.se.com/ua/uk/>

50. Моделювання автоматичної системи керування швидкістю безконтактного приводу / Іонов П.В., Майдан П.С., Макаришкін Д.А., Соколан Ю.С., Форкун Ю.В. // ВИМІРЮВАЛЬНА ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ. 2023. - №3. - С. 190-196.

ДОДАТКИ

Додаток А

Стаття у фаховому журналі

Міжнародний науково-технічний журнал
«Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»

ISSN 2219-9365

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-22>

УДК 681.1, 681.5, 621.8

ІОНОВ Павло
Хмельницький національний університет
МАЙДАН Павло
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0003-3319-8730>
maidanp@khmnu.edu.ua
МАКАРИШКІН Денис
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0003-3447-811X>
makaryshkin@ukr.net
СОКОЛАН Юлія
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-0273-5719>
sokolan.julia@gmail.com
ФОРКУН Юрій
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0002-7906-4191>
forkynjv@khnu.km.ua

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ БЕЗКОНТАКТНОГО ПРИВОДУ

Загально відомо, що промислові роботи (ПР) - багатофункціональні механічні пристосування, що складаються із механічної руки та програмованої системи керування, які можуть бути використані для переміщення різних об'єктів - деталей, інструментів, матеріалів або спеціалізованих пристроїв, шляхом використання різноманітних запрограмованих рухів у різних технологічних процесах (ТП).

ПР можуть замінити людину-робітника там, де потрібна важка фізична праця, в умовах підвищеної вологості чи надмірної температури, вібрації, шуму, радіоактивності чи забруднення повітря та вибухонебезпечності. Такі ПР є перепрограмованими автоматичними машинами з можливістю виконувати рухові функції, подібні до рухів людини-робітника, для об'єктів або технологічного оснащення [1-4].

Система ПР може містити у собі будь-які пристрої або давачі сигналів, необхідні для виконання ПР поставлених задач, а також упорядкування та моніторингу інтерфейсів зв'язку.

ПР, як правило, використовують для виконання небезпечних, неприємних чи частоповторюваних задач. Вони володіють багатьма різними функціями, такими як вантажно-розвантажувальні роботи, завантаження та вивантаження верстатів, дугове зварювання, монтаж, зварювання тертям, розпилення або фарбування.

Ключові слова: мехатроніка, промисловий робот, вентильний двигун, безконтактний привід, моделювання, система автоматичного керування, цифровий двійник, MATLAB, SIMULINK.

IIONOV Pavlo, MAIDAN Pavlo, MAKARYSHKIN Denys, SOKOLAN Julia, FORKUN Yurii
Khmelnyskyi National University

MODELING OF AN AUTOMATIC SPEED CONTROL SYSTEM FOR A CONTACTLESS DRIVE

It is well known that industrial robots (IR) are multifunctional mechanical devices consisting of a mechanical arm and a programmable control system that can be used to move various objects - parts, tools, materials or specialized devices - by using a variety of programmed movements in different technological processes (TP).

They can replace human workers where heavy physical labor is required, in conditions of high humidity or excessive temperature, vibration, noise, radioactivity or air pollution, and explosion hazards. Such IRs are reprogrammable automatic machines with the ability to perform motor functions similar to those of a human worker for objects or technological equipment [1-4].

The IR system can include any devices or signal sensors necessary for the IR to perform its tasks, as well as to organize and monitor communication interfaces.

IRs are usually used to perform dangerous, unpleasant, or repetitive tasks. They have many different functions, such as handling, loading and unloading machines, arc welding, assembly, friction welding, spraying, or painting.

Key words: mechatronics, industrial robot, valve motor, contactless drive, modeling, automatic control system, digital twin, MATLAB, SIMULINK.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Тенденція розширення існуючого парку ПР на сучасному етапі розвитку виробництва викликана цілою низкою об'єктивних чинників. За звичай, це підвищення загальної продуктивності виробництва при збереженні високої якості продукції та здатність швидко реагувати на зміни ринку споживання [1-4].

International Scientific-technical journal
«Measuring and computing devices in technological processes» 2023, Issue 3

Серйозними стимулами інвестування у автоматизацію виробництва та використання ПР є наступні:

- збільшення працівників від монотонної, інтенсивної та важкої роботи на виробництві;
- відсутність достатньої кількості кваліфікованої робочої сили для виробництва;
- безперервне зниження витрат на використання ПР на тлі постійного зростання витрат на оплату праці кваліфікованих робітників;
- можливість часткового покращення екологічної ситуації та зниження шкідливого впливу виробництва на здоров'я працівників, наприклад від ТП зварювання;
- підвищення загальної точності виконання технічних операцій та підвищення кінцевої якості готового продукту;
- можливість використання встановленого технологічного обладнання в три зміни або 24 години 7 днів на тиждень, 365 днів на рік.

Перехід до роботизованого контролю, що заснований на використанні програмованих логічних контролерів (або PLC) надасть наступні переваги: - загальна програмна документація; - загальна методологія програмного резервного копіювання/відновлення; - загальні програмні інтерфейси; - загальні елементи керування програмування (програмне забезпечення (ПЗ), кабелі тощо) [1-4].

Аналіз досліджень та публікацій

Вентильні електродвигуни (ВД) [5], які використовують у складі електроприводів та систем керування (СК) ПР, вимагають, за звичай, стабілізації або виконання регулювання швидкості обертання. У більшості випадків для цього використовують загальний принцип керування за відхиленням керованої величини, відповідно з яким задане значення швидкості обертання електродвигуна Ω_s порівнюється із фактичним вимірним значенням швидкості обертання Ω_T і тоді обраховане відхилення (помилка) швидкості обертання $\Delta\Omega = \Omega_s - \Omega_T$ посилюється та перетворюється в керуючий (задаючий) вплив електродвигуна [5].

В якості математичної моделі електроприводу з ВД будемо використовувати математичний опис узагальненої електричної машини та спеціальних вузлів підсилювально-перетворювального пристрою. Будучи, так би мовити, проміжною ланкою між експериментальними та теоретичними дослідженнями, моделювання дає змогу усунути труднощі, якими характеризуються проведення справжніх досліджень.

Виконуючі порівняння із теоретичними дослідженнями, моделювання ВД полегшує оцінку впливу реакції якоря, нелінійностей та можливих перешкод в електромеханічних пристроях, насичення магнітного кола; спрощує розрахунок характеристик за наявності кіл корекції та аналіз СК за наявності декількох постійних часу (більше двох) [5, 6].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: моделювання СК швидкістю безконтактного приводу ПР на основі PLC, для виконання необхідних аналітичних досліджень роботи системи в якості цифрового двійника.

Виклад основного матеріалу

На рисунку 1 представлено загально відому векторну діаграму двофазного синхронного електромеханічного перетворювача (СЕМП) у системах координат α, β та d, q (причому вісь d спрямована за вісю збудження ротора (та збігається із напрямком вектору потоку Φ_r). Система d, q виконує обертання проти годинникової стрілки відносно системи α, β із заданою кутовою швидкістю ω .

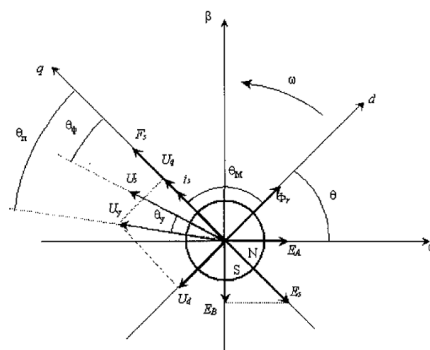


Рис. 1. Загальний вигляд векторної діаграми СЕМП

За необхідності спрямувати вектор сили струму статора I_s за напрямком осі q , вектор напруги U_s повинен бути спрямований з випередженням на деякий кут θ , що характеризує відставання сили струму від напруги в ланцюзі із наявністю індуктивності. В ВД вектор напруги статора U_s формується електронним підсилювально-перетворювальним пристроєм, що складається із підсилювачів потужності (ПП) фаз та перетворювача координат (ПК) [5, 6].

Під час роботи двофазного СЕМП із постійними магнітами розташованими на роторі та взаємно перпендикулярними фазами А та В статорної обмотки у складі ВД, керування здійснюється електронним підсилювально-перетворювальним пристроєм, що формує фазні напруги за будь-яким заданим законом.

ПК - це спеціалізований пристрій для обчислення, що реалізує рівняння перетворення величин із рухомої системи координат, пов'язаної з ротором, у нерухому, пов'язану зі статором [5, 6]. Функцію ПК можливо реалізувати, при цьому ПК реалізує наступний алгоритм:

$$\begin{aligned} U_\alpha &= k_{ПК} \cdot \left[-U_q \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) \right] \\ U_\beta &= k_{ПК} \cdot \left[U_q \cdot \sin \Theta \right], \end{aligned} \quad (1)$$

де $k_{ПК}$ - постійний коефіцієнт передачі ПК.

ПП - підсилювач, що працює в даному випадку в режимі посилення сигналу напруги (інвертора напруги) та описується за допомогою постійного коефіцієнту передачі за величиною напруги k_{PA} . З урахуванням даного коефіцієнта рівняння фазної напруги мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} U_A &= k_{PA} \cdot U_\alpha; \\ U_B &= k_{PA} \cdot U_\beta. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким чином, підсилювально-перетворювальний пристрій можливо охарактеризувати деяким коефіцієнтом передачі згідно із формулою:

$$k_A = k_{PA} \cdot k_{PC}. \quad (3)$$

Підсилювально-перетворювальний пристрій може бути охарактеризовано за кожним каналом, як, наприклад, динамічну ланку першого порядку за допомогою використання еквівалентної сталі часу T_e , що обумовлює зсув фаз $\theta_y = \tan \omega \cdot T_e$ між векторами величини напруги керування U_c та величини напруги на статорі U_{st} , а також деяким коефіцієнтом передачі k_A .

Виконавши підстановку рівнянь (1) в систему рівнянь (2) та враховуючи величини запізнювання, що зумовлені сумарною інерційністю як ПК так і ПП, виконаємо запис диференціальних рівнянь для величин фазних напруг ВД у нерухомій α, β системі координат [5, 6]:

$$T_y \cdot \frac{dU_A}{dt} + 1,73 \cdot U_A = -U_q \cdot k_y \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) \right]; \quad (4)$$

$$T_y \cdot \frac{dU_B}{dt} + U_B = k_y \cdot \left[U_q \cdot \sin \Theta \right]. \quad (5)$$

Запишемо рівняння для сил струму статорних обмоток:

$$\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) = \cos \Theta; \quad (6)$$

$$2 \cdot T_\varphi \cdot \frac{di_A}{dt} + i_A = \frac{1}{2 \cdot R} \left(1,73 \cdot U_A + C_E \cdot \Omega \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) \right] \right); \quad (7)$$

$$2 \cdot T_\varphi \cdot \frac{di_B}{dt} + i_B = \frac{1}{R} (U_B - C_E \cdot \Omega \cdot \sin(\Theta)). \quad (8)$$

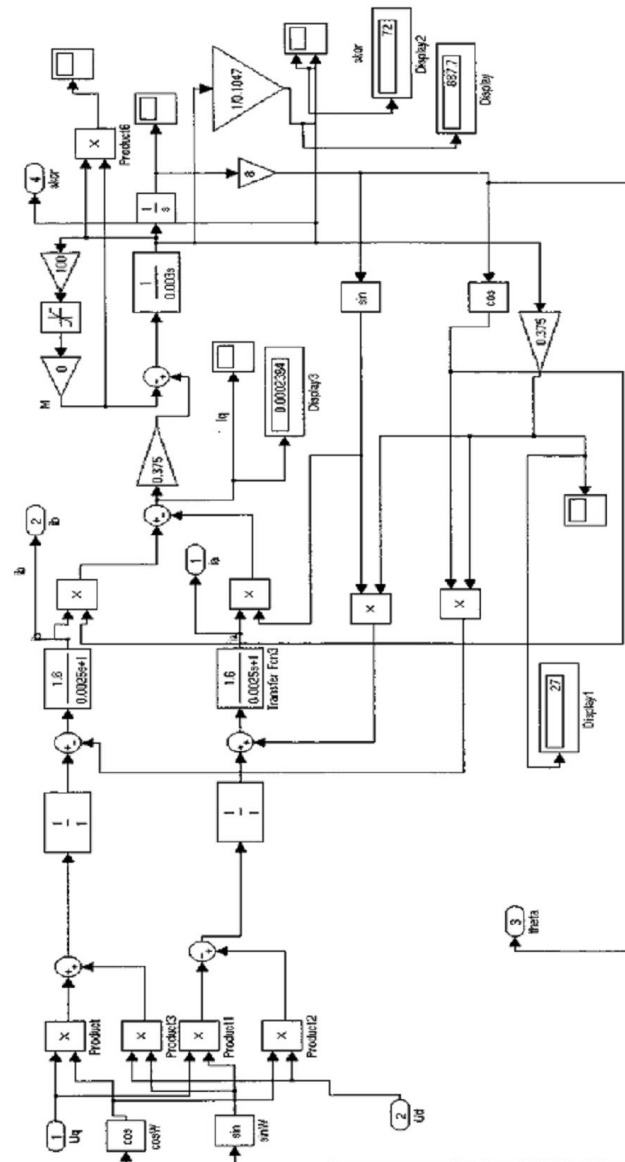


Рис. 2. Розроблена модель двофазного ВД

Тоді рівняння для визначення величини крутного моменту буде мати наступний вигляд:

$$\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) = \cos\Theta; \quad (9)$$

$$M = C_M \cdot (i_B \cdot \sin\Theta - i_A \cdot \cos\Theta). \quad (10)$$

Рівняння рівноваги моментів прикладених до валу електродвигуна матиме наступний вигляд:

$$\frac{J \cdot d\Omega}{dt} = M - M_B, \quad (11)$$

де θ_0 - початковий кут виставки давача положення ротора; k_A - коефіцієнт передачі підсилювально-перетворювального пристрою; i_A, i_B - сила струму у фазах A, B ; U_d, U_q - величина напруги на входах d, q ; U_a, U_b - величина напруги у фазах A, B ; C_M - коефіцієнт моменту; M_B - момент навантаження з боку дії сили збурення; J - момент інерції ротора із урахуванням дії навантаження.

Для побудови комп'ютерної моделі електроприводу із ВД будемо використовувати програмний пакет MATLAB [7, 8] тому використовуючи систему рівнянь (1-11), в додатку SIMULINK було розроблено модель двофазного ВД на базі СЕМП типу ДБМ 150-4-0,6-2 [5, 6] зі схемою векторного керування (див. рис. 2).

Модель БМП із векторним керуванням наведено на рисунку 3.

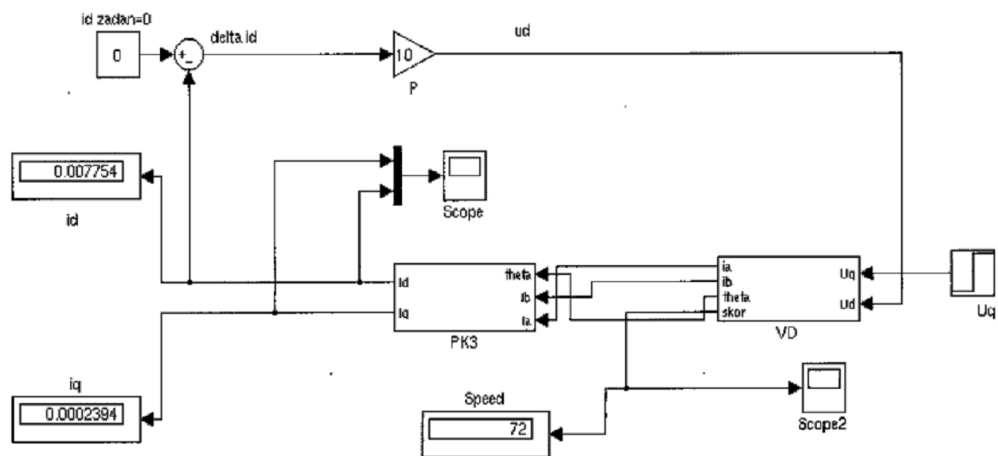


Рис. 3. Розроблена модель безконтактного приводу з векторним керуванням

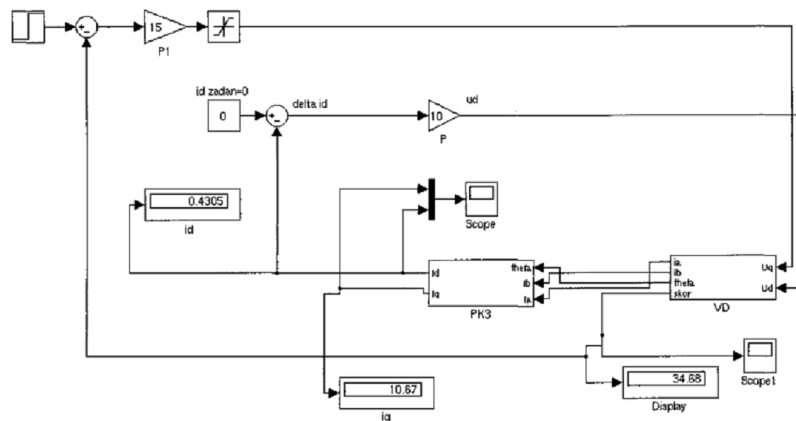


Рис. 4. Розроблена модель СК швидкістю БМП з векторним керуванням

Модель СК швидкістю БМП із векторним керуванням наведена на рисунку 4. Задана швидкість обертання на вході системи дорівнює половині величини швидкості обертання холостого ходу. Разом із моментом навантаження, що дорівнює чверті значення пускового крутного моменту ($M_{w.p.} = 4 \text{ Н*м}$), ці

значення швидкості обертання та крутного моменту визначають робочу точку на механічні характеристики СК.

Швидкість обертання зі входу порівнюється з результативною швидкістю обертання та далі надходить на регулятор швидкості (РШ). Коефіцієнт РШ $k_{rs} = 15$ підбрано експериментальним шляхом та забезпечує допустимі перехідні процеси СК швидкістю обертання, а також найменше падіння значення швидкості обертання відносно заданого значення швидкості обертання. У схемі також використовується обмежувач, що обмежує величину напруги U_q (не вище 27 В постійного струму). Блок VD являє собою ВД (див. рис. 3) та блок СТ - ПК. Регулятор R2 та його коефіцієнт підбрано експериментальним шляхом у процесі виконання моделювання схеми векторного керування.

Після аналізу отриманих характеристик системи очевидно, що перерегулювання становить приблизно 52%, показник коливання знаходиться на рівні $M = 1.52$. Отже, запропонована СК задовольняє встановленим вимогам тому, що показник коливальності нижчий, ніж задане значення $M = 1.7$ [7, 8].

Можна зробити висновок, що, згідно із отриманими результатами моделювання, розроблена СК швидкістю БМП забезпечує зменшення більш ніж у 7 разів падіння швидкості обертання під час зростання номінального моменту навантаження порівняно із нерегульованим приводом. Отже, дана система дає змогу підвищити якість роботи. Це моделювання доводить, що отримана в результаті СК швидкістю БМП функціональна та задовольняє встановленим технічним вимогам.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Відповідно до результатів розрахунків та моделювання СК швидкістю ВД, можна зробити наступні висновки:

- СК швидкістю ВД зі схемою векторного керування, функціональність якої було змодельовано в програмному пакеті MATLAB, може ефективно компенсувати вплив постійних часу, що призводить до механічних характеристик ВД, близьких до ідеальних;

- векторне керування призводить до поліпшення динаміки всього приводу з ВД, що пояснюється підвищенням лінійності механічні характеристики електродвигуна;

- перехідні процеси СК швидкістю обертання БМП із обраними параметрами регуляторів контуру струму та швидкості задовольняють встановленим вимогам технічного завдання за показника коливальності $M = 1.52$, що не перевищує заданого значення показника $M = 1.7$;

- розроблена СК швидкістю БМП забезпечує величину падіння швидкості обертання ВД під час зростання номінального моменту навантаження в 7 разів меншу, ніж при використанні системи без схеми керування швидкістю обертання, що дає змогу підвищити якість роботи.

Література

1. Робототехнічні системи: проєктування і моделювання [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» / М. М. Поліщук, М.М. Ткач; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 41,6 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. - 112 с.

2. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. Springer Heidelberg, New York, 2012. - 178p.

3. Auke Ijspeert, Carlo Menon. Modelisation and Simulation of Climbing Robots. Master Project, Simon Ruffieux, Simon Fraser University, 2008.- 21p.

4. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні / [Л.Є.Пелевін, К. І. Почка, О. М. Гаркавенко та ін.]. – К.: Інтерсервіс, 2016. – 258 с.

5. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с. ISBN 978-617-7541-11-9.

6. Островерхов, М. Я. Електричні машини та електропривод [Електронний ресурс]: розрахункова робота для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Автоматизація хіміко-технологічних процесів і виробництв» / М. Я. Островерхов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 466,01 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 76 с. (доступ за посиланням <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22742>)

7. Matlab Documentation. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>

8. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>

References

1. Robototekhnichni systemy: proiektuvannya i modeliuvannya [Elektronnyi resurs]: navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 126 «Informatsiini systemy ta tekhnolohii» / M. M. Polishchuk, M.M. Tkach; KPI im. Ihoria Sikorskoho. Elektronni tekstovi dani (1 fail: 41,6 Mбайт). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2021. - 112 s.

2. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. Springer Heidelberg, New York, 2012. - 178p.
3. Auke Ijspeert, Carlo Menon. Modelisation and Simulation of Climbing Robots. Master Project, Simon Ruffieux, Simon Fraser University, 2008.- 21p.
4. Syntez robototekhnichnykh system v mashynobuduvanni / [L.Ie.Pelevin, K. I. Pochka, O. M. Harkavenko ta in.]. – K.: Interservis, 2016. – 258 s.
5. Elektrychni mashyny i transformatory : navch. posibnyk / M. O. Ostashevskiy, O. Yu. Yurieva; za red. V. I. Milykh. – Kharkiv : FOP Panov A. M., 2017. – 452 s. ISBN 978-617-7541-11-9.
6. Ostroverkhov, M. Ya. Elektrychni mashyny ta elektropryvod [Elektronnyi resurs]: rozrakhunkova robota dlia studentiv spetsialnosti 151 «Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii», spetsializatsii «Avtomatyzatsiia khimiko-teknolohichnykh protsesiv i vyrobnytstv» / M. Ya. Ostroverkhov ; KPI im. Ihoria Sikorskoho. – Elektronni tekstovi dani (1 fail: 466,01 Kbait). – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2018. – 76 s. (dostup za posylanniam <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22742>).
7. Matlab Documentation. [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>
8. Simulink Documentation [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>

Додаток Б
Презентаційні слайди

Метод керування безконтактним електроприводом промислового робота

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

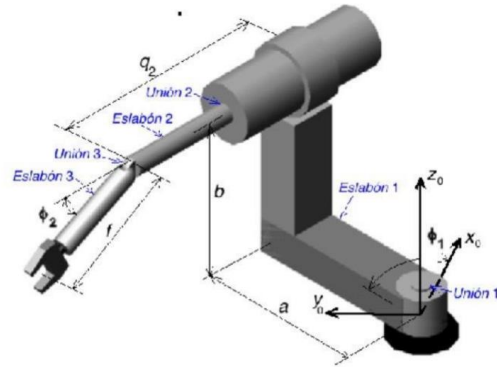
АКТУАЛЬНІСТЬ

ПР можуть замінити людину-робітника там, де потрібна важка фізична праця, в умовах підвищеної вологості чи температури, шуму, вібрації, радіоактивності, забруднення повітря та вибухонебезпечності. Такі ПР є перепрограмованими автоматичними машинами з можливістю виконувати рухові функції, подібні до людських, для рухомих об'єктів або технологічного оснащення.

Метою роботи є моделювання системи керування швидкістю безконтактного приводу на основі PLC, для виконання необхідних аналітичних досліджень роботи системи в якості цифрового двійника.

Об'єктом дослідження є процеси в безконтактному приводі в автоматизованій системі керування промисловим роботом.

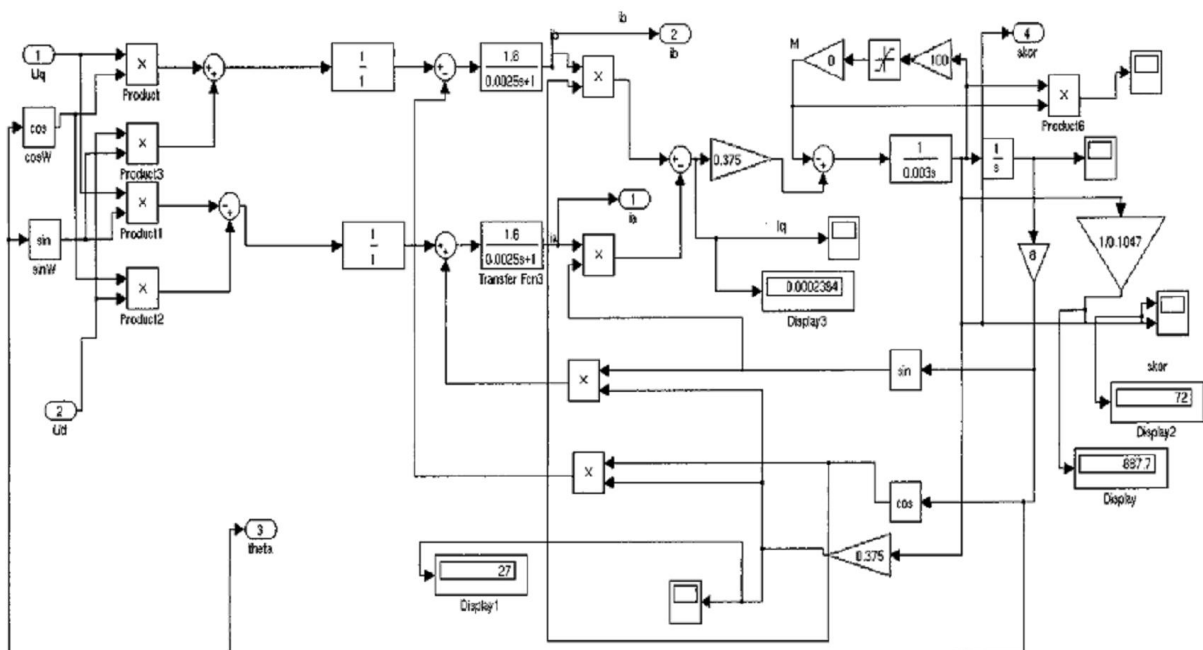
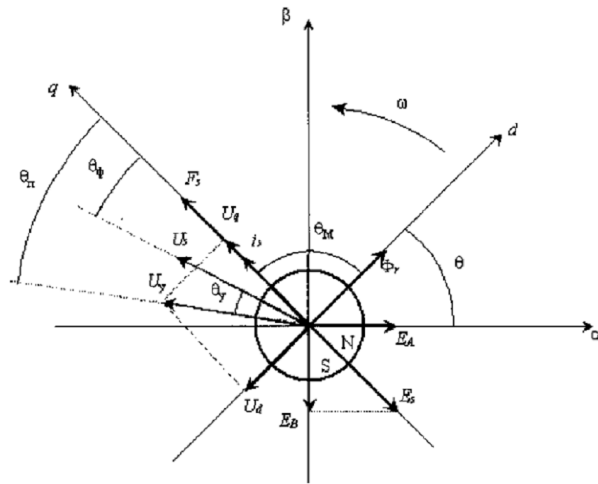
Предметом дослідження є методи та алгоритми керування швидкістю безконтактного приводу для промислового робота на основі PLC.

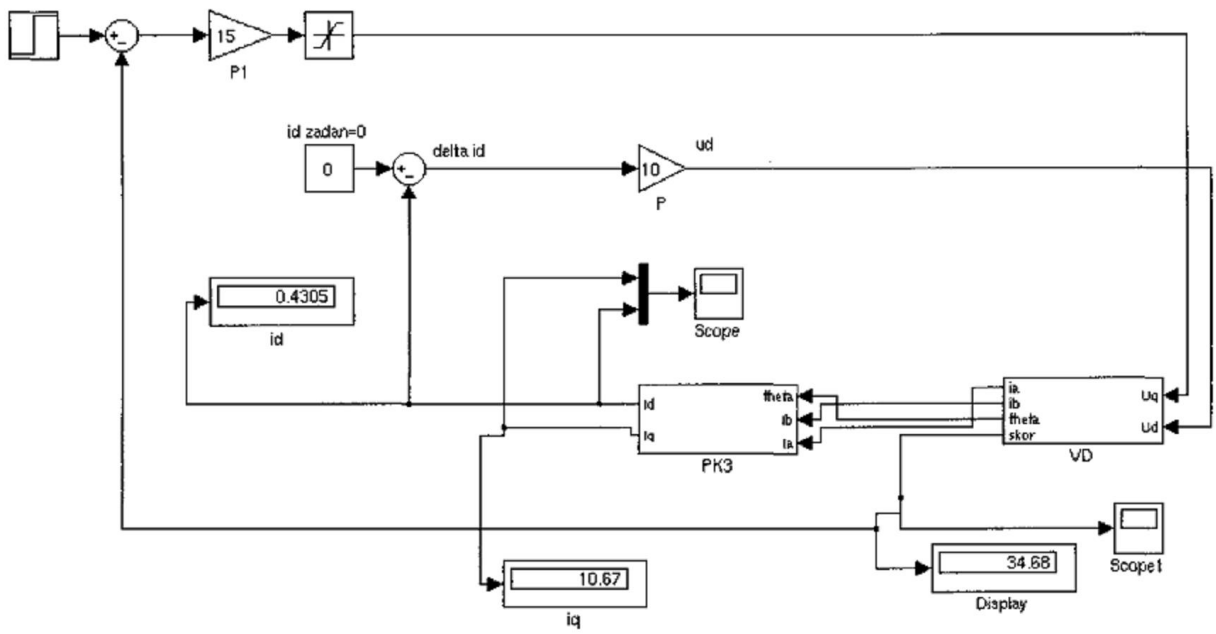
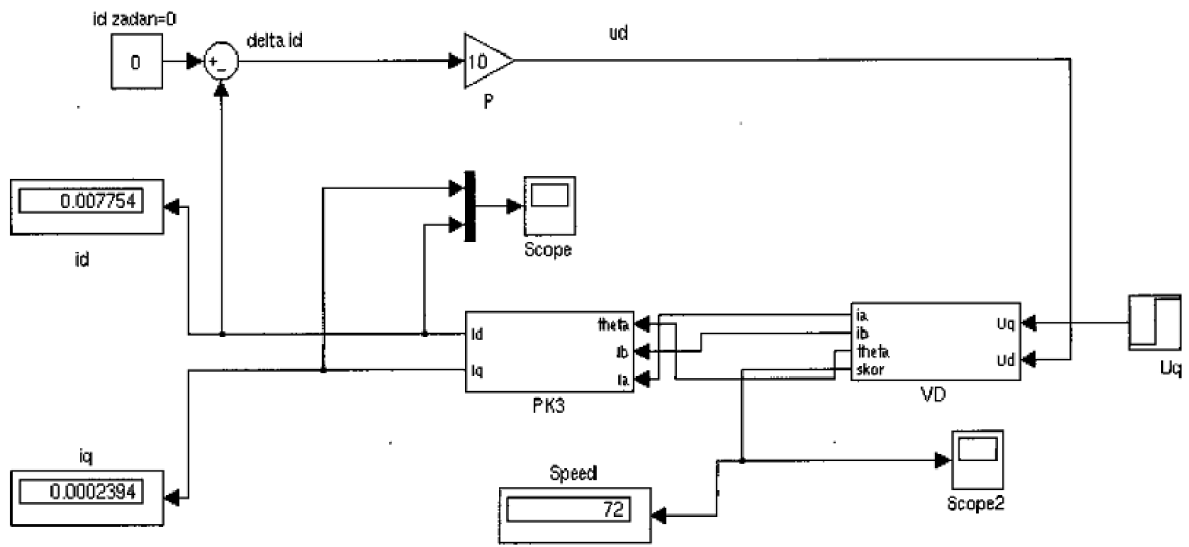


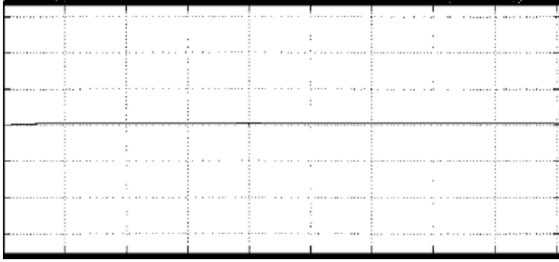
ЗАВДАННЯ

- розглянути СК швидкістю безконтактного електропривода розроблену на основі PLC;
- здійснити вибір та розрахунок вентильного електродвигуна;
- виконати моделювання СК швидкістю зі схемою векторного керування електродвигуном та дослідити характеристики;
- здійснити вибір PLC для спроектованої СК;
- виконати перевірку отриманих результатів розрахунків за допомогою моделювання у програмному середовищі Simulink MATLAB.

Загальний вигляд векторної діаграми СЕМП

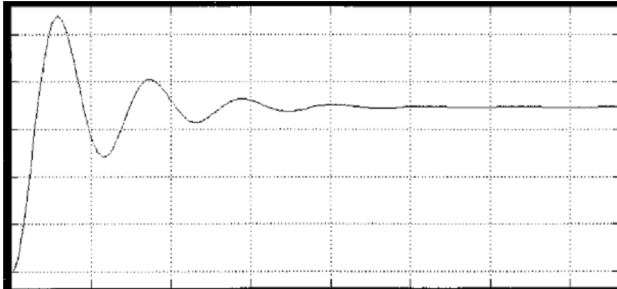
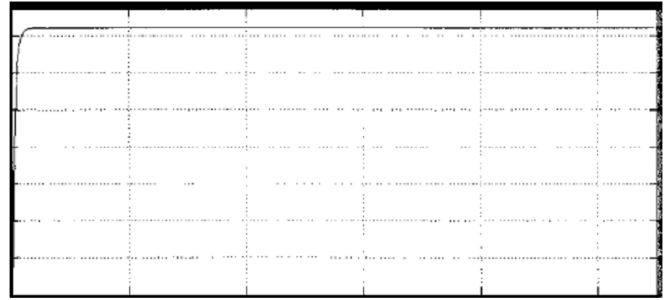






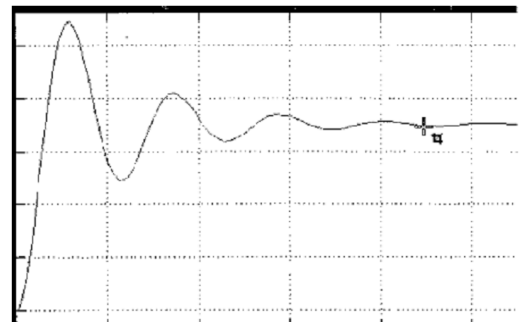
Графічна залежність перехідного процесу при величині пускового моменту $M=12$ для розімкнутої системи

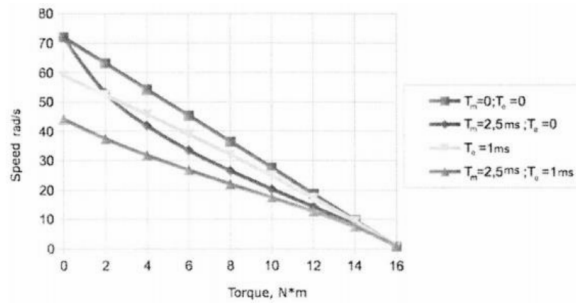
Графічна залежність перехідного процесу без навантаження для розімкнутої системи



Графічна залежність перехідного процесу в робочій точці

Графічна залежність перехідного процесу без навантаження

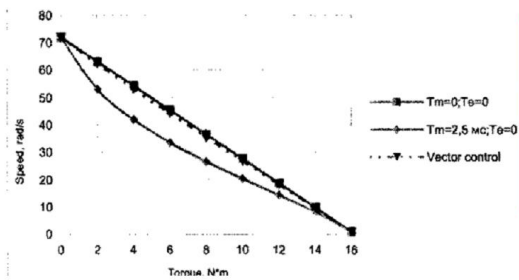
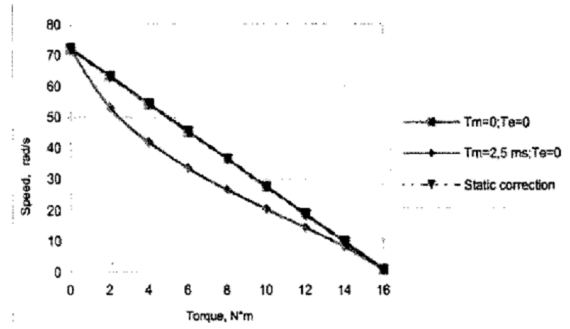




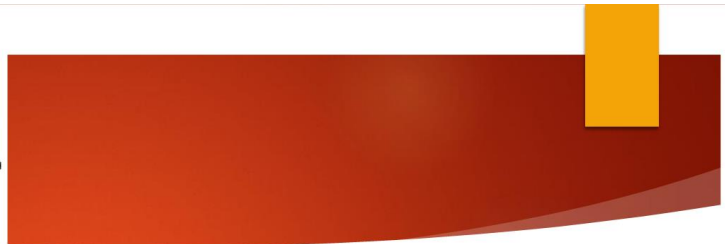
Графічні залежності МХ БМП типу ДБМ150-4-0,6-2



Графічні залежності МХ ВД із статичною корекцією



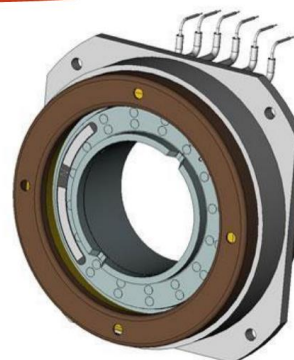
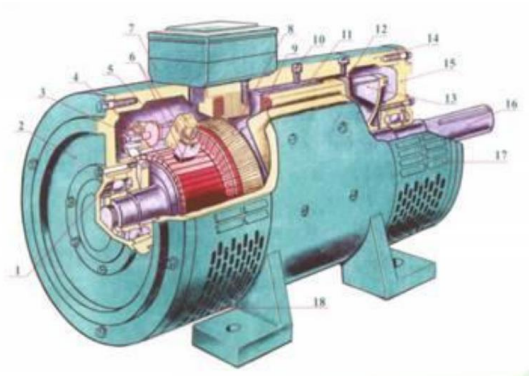
Графічні залежності МХ для схеми векторного керування ВД



Графічні залежності МХ СК швидкістю БМП



Підбір двигуна для системи керування швидкістю безконтактного приводу

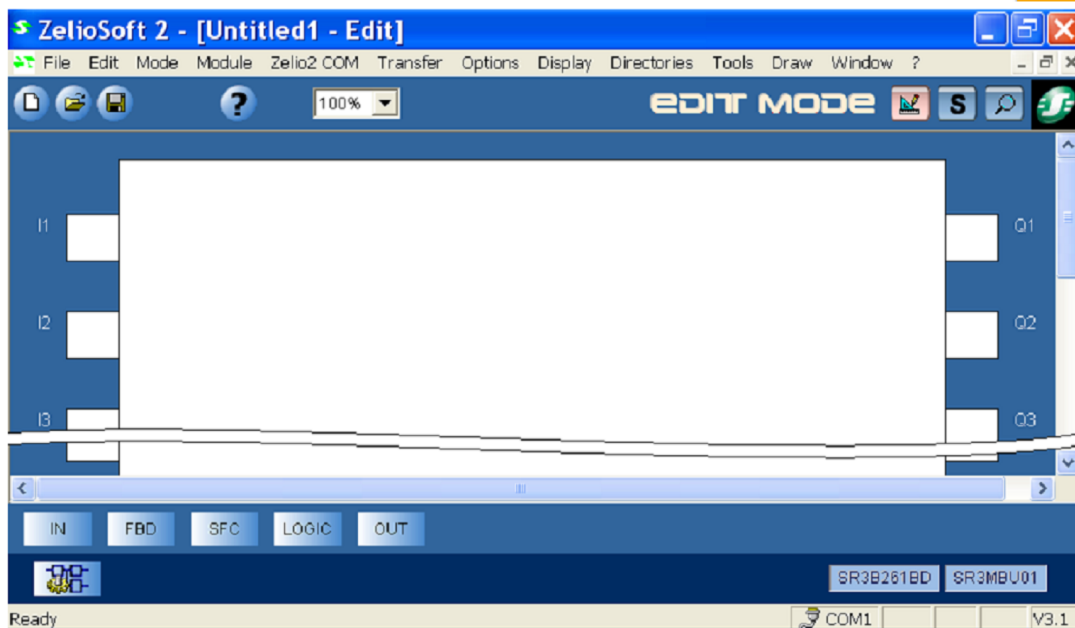


Типи PLC та PAC





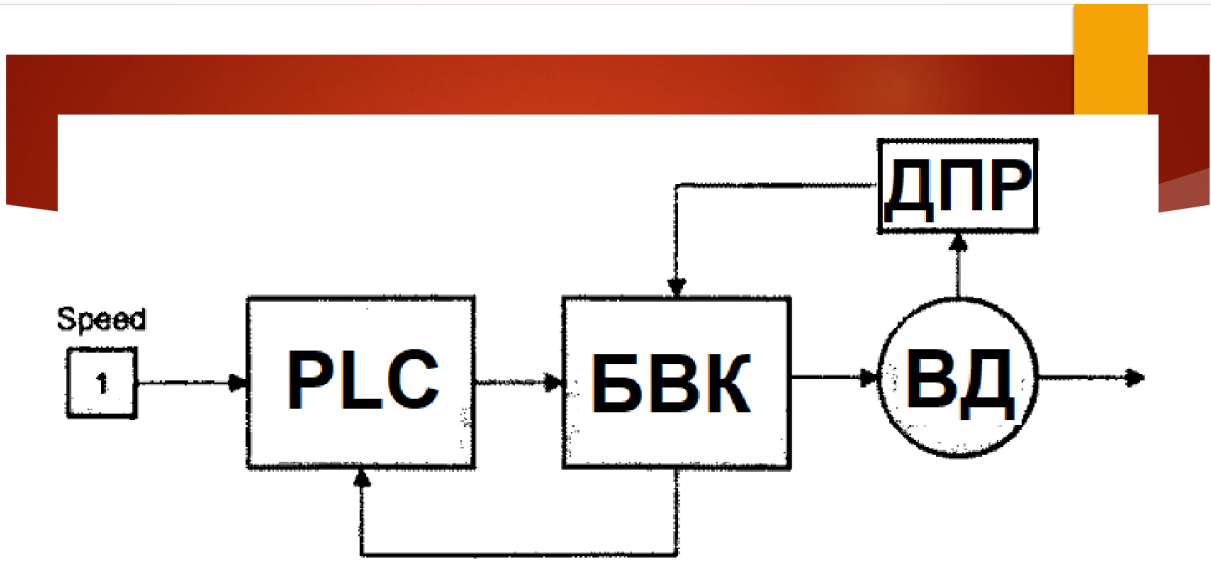
Загальний вигляд
реле Zelio Logic
SR2B121 BD



Загальний вигляд головного вікна програмного середовища Zelio Soft 2 у режимі редагування програми на мові FBD

| No | Contact 1 | Contact 2 | Contact 3 | Contact 4 | Contact 5 | Coil | Comment |
|-----|--|--|-----------|---------------------------------------|-----------|--|---------------|
| 001 | i1 <input type="checkbox"/> Forward | | | | | RT1 <input type="checkbox"/> Timing | Motor command |
| 002 | I2 <input type="checkbox"/> Reverse | | | | | | |
| 003 | I1 <input type="checkbox"/> Forward | M3 <input type="checkbox"/> Auxiliary relay | | t1 <input type="checkbox"/> Timing | | SM1 | |
| 004 | | | | | | TT3 | |
| 005 | | | | | | RT4 | |

Загальний вигляд головного вікна програмного середовища Zelio Soft 2 у режимі редагування програми на мові LAD



Загальний вигляд функціональної схеми СК швидкістю обертання БМП

Додаток В

Таблиця В.1 – Параметри приводної системи промислового роботу

| Параметр | Значення |
|---|----------|
| Момент інерції частин, що обертаються, J кг*м | 0,053 |
| Статичний момент навантаження, $M_{st.i.}$, Н*м | 1 |
| Максимальне знач. кутової швидкості, J_{2N} , градус/с | 200 |
| Напруга живлення синхронної машини, U_s , В | 27 |
| Максимальне знач. кут. прискорення, s_N , градус/с ² | 1080 |
| Температура навколишнього середовища, T_{ep} , С ⁰ | 60 |
| Показник коливальності, M | 1,7 |

Таблиця В.2 – Параметри двигуна БМЕ 150-4-0,6-2

| Параметр | Значення |
|---|-------------------|
| Опір секції обмотки статора при температурі 20°C R, Ом | 0,31 |
| Пусковий струм в фазі обмотки статора I , А | 43,5 |
| Пусковий момент M_p , Н м | 16,3 |
| Частота обертання при холостому ході n , об/хв | 690 |
| Максимальна механічна потужність P , Вт | 294 |
| Електромеханічна постійна часу T_m , мс | 13 |
| Електромагнітна постійна часу фази T_e , мс | 1,5 |
| Коефіцієнти: моменту C_m , Н м/А ; ЕРС C_e , В-с/рад (середньостатистичні значення приведені до фази) | 0,375 |
| Гранично допустимий струм в секції (фазі) обмотки статора, А | 120 |
| Тепловий опір статора, °С/Вт | 0,2 |
| Маса, кг | 3,0 |
| Момент інерції ротора J , кг-м | $3 \cdot 10^{-3}$ |
| Номінальна напруга живлення $u_{ном}$, В | 27 |

Таблиця В.3 - Характеристики інтелектуального реле SR2B121BD

| Параметр | Значення |
|--|---|
| Локальний дисплей | є |
| Кількість строчок в програмі або функціональних блоків | 120 для LAD майже 200 для FBD |
| Час виконання циклу | 6...90 мс |
| Термін резервного зберігання даних | 10 років при 25 °С |
| Похибка годинника | 6 с за місяць при 25°С 12 хв за рік при 0...55°С |
| Номінальна напруга живлення | 24 В постійного струму |
| Границі напруги живлення | 19,2...30 В |
| Сила струму | 100 мА (без модулів розширення) |
| Потужність, що розсіюється | 3 Вт (без модулів розширення) |
| Захист від вмикання із зворотною полярністю | є |
| Число аналогових входів | 4 |
| Тип аналогового входу | Загальний режим |
| Діапазон аналогового входу | 0...10 В або 0...24 В |
| Максимально допустима напруга | 30 В |
| Розрішення аналогового входу | 8 біт |
| Значення молодшого біта | 39 мВ |
| Час перетворення | Час циклу інтелектуального реле для ланцюга аналогового входу |
| Похибка перетворення | +/- 6,2% при 55°С для ланцюга аналогового входу +/- 5% при 25°С для ланцюга аналогового входу |
| Повторюваність позиціонування | +/- 2 % при 55 °С для ланцюга аналогового входу |
| Робоча відстань | 10 м між станціями, з екранованим кабелем (давач не розв'язаний гальванічно) для ланцюга аналогового входу |
| Вхідний імпеданс | 7,4 кОм (ланцюги дискретних входів I1...ІАНІН...ІR) 12 кОм (ІВ...ІG використовується як ланцюг дискретного входу) 12 кОм (ІВ...ІG використовується як ланцюг аналогового входу) |
| Кількість виходів | 4 релейних виходи |
| Границі вихідної напруги | 5...30 В постійного струму 24...230 В змінного струму |
| Величина вихідного струму | 8 А для всіх 4 виходів |
| Комутаційна здатність | більше 10 мА на 12 В |
| Робоча частота | 10 Гц (режим холостого ходу) для релейного виходу 0.1 Гц (при 1e) для релейного виходу |
| Час відгуку | 5 мс (зі стану 1 у стан 0) для релейного виходу 10 мс (зі стану 0 у стан 1) для релейного виходу |

| | |
|----------------|---------|
| Момент затяжки | 0,5 Н*м |
| Маса виробу | 0,25 кг |

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод керування безконтактним електроприводом промислового робота
Автор: Іонов Павло Валдимович
Спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Науковий керівник: Форкун Юрій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент
Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

| № | Висновок | Позначка про відповідність |
|---|--|----------------------------|
| 1 | Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту. | відповідає |
| 2 | Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи | |
| 3 | Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат. | |
| 4 | Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту. | |
| 5 | Інше: | |

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноновживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.


Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 4,3% і адресується до 137 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Дата 21.12.2023

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

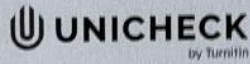
Керівник кваліфікаційної роботи



Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Юрій ФОРКУН



Ім'я користувача:
Кафедра АКІТІТК

Дата перевірки:
06.12.2023 12:54:11 EET

Дата звіту:
06.12.2023 13:15:27 EET

ID перевірки:
1015953890

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

ID користувача:
100005862

Назва документа: **іонов_антиплаг**

Кількість сторінок: 83 Кількість слів: 14023 Кількість символів: 105056 Розмір файлу: 1,44 MB ID файлу: 1015664560

(430 слів позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів)

4.13%

Схожість

Найбільша схожість: 1.48% з джерелом з Бібліотеки (ID файлу: 1015664561)

1.1% Джерела з Інтернету 137 Сторінка 85

1.7% Джерела з Бібліотеки 29 Сторінка 86

0% Цитат

Вилучення цитат вимкнено

Посилання 1 Сторінка 86

0.01%

Вилучень

Деякі джерела вилучено автоматично (фільтри вилучення: кількість знайдених слів є меншою за 8 слів та 0%)

0.01% Вилучення з Інтернету 13 Сторінка 87

0% Вилученого тексту з Бібліотеки 24 Сторінка 87

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Змінені символи 10

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 6.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA, Помилки в документах: 8%

| | | | | |
|---|----------|---------|-----------------------------|---------|
| ID: 122178 Назва: Метод керування безконтактним електроприводом промислового робота Додано в БД: 2023-12-08 Автор: Павло ІОНОВ Керівники: Юрій ФОРЖУН Консультанти: Опоненти: | Документ | | Сумарний збіг по Базі Даних | |
| | Символи | Лексеми | Символи | Лексеми |
| | 82024 | 1189 | 5653 (7%) | 79 (7%) |

| | | | |
|----|------------------|-------------------------------|---------|
| ID | Джерело плагиату | Навність плагиату в документі | |
| | | Символи | Лексеми |
| | Опис | | |

Завідувачу кафедри АКІТгаР
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Іонов П.В.

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТм-22-1

ЗАЯВА

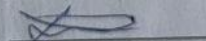
З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

08.12.2023

дата



підпис

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Іонов Павло Валдимович

Тема: Метод керування безконтактним електроприводом промислового робота

Спеціальність: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень _____ Кількість сторінок записки _____ 80 _____

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: створено систему керування швидкістю безконтактного приводу на основі PLC

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі виконано аналітичний огляд та аналіз існуючих технічних рішень приводних систем промислових роботів, наведено пояснення основних принципів приводних систем. Розглянуто існуючу класифікацію систем керування рухом інструмента промислового робота. Виконано постановку завдань для автоматизації системи керування швидкістю безконтактного електроприводу ПР. У другому розділі виконано моделювання системи керування швидкістю вентильного електродвигуна та представлено необхідні аналітичні розрахунки. У третьому розділі виконано підбір необхідного електроприводу типу БМЕ серії 150-4-0,6-2 за базовою схемою керування з пусковим моментом на рівні 16,3 Н*м. У четвертому розділі виконано вибір інтелектуального реле типу Zelio Logic SR2B121BD, при цьому ми керувались наступними критеріями: функціональністю, наявністю технічної підтримки, знання користувача, ціною та характеристиками БМЕ, для реалізації спроектованої СК швидкістю обертання. Також було розроблено функціональну схему СК швидкістю БМП на основі PLC.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: у роботі недостатньо уваги приділяється програмній реалізації

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

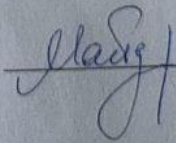
8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: добре (4,50/В)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Павло Сергійович Майдан, кандидат технічних наук, доцент, кафедра Машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем, Хмельницький національний університет

"15" 12 2023 р.

 (підпис)