

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
Наталія СТЕЛЬМАХ
«12» 06 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та спеціальності
технології у приладобудуванні»

151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» на тему:
«Автоматизована система керування електромеханічним приводом
промислового маніпуляційного робота»

Виконав:
студент IV курсу, групи ПБ-22
Шахрай Дмитро Андрійович
Керівник:
доцент, к.т.н,
Лісовець Сергій Миколайович
Рецензент:
д.т.н., проф.
Микитенко В.І.

Засвідчую, що у цій дипломній
роботі немає запозичень
з праць інших авторів без
відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Наталія СТЕЛЬМАХ

«12» 06 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту
Шахраю Дмитру Андрійовичу

1. Тема роботи «Автоматизована система керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота», керівник роботи Лісовець Сергій Миколайович, доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від «26» 05 2026 р. №1905-с
2. Термін подання студентом роботи 15 червня 2026 року.
3. Вихідні дані до роботи: вантажопідйомність робота – до 8 кг; кількість ступенів свободи робота – 6; використання засобів обчислювальної техніки в системі керування – так; локальне і дистанційне керування роботом за допомогою SCADA-системи – так; тип двигуна електромеханічного приводу – серводвигуни змінного струму.
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ Розділ 1. Огляд і аналіз існуючих систем керування приводами промислових роботів 1.1. Загальна характеристика промислових роботів та їх приводів 1.2. Класифікація приводів промислових роботів 1.3. Огляд систем керування електромеханічними приводами 1.4. Аналіз методів керування приводами маніпуляційних роботів 1.5. Порівняльний аналіз існуючих рішень Висновки до розділу 1 Розділ 2. Розроблення системи керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота 2.1. Постановка задачі керування електромеханічним приводом 2.2. Розроблення структурної схеми системи керування 2.3. Вибір основних елементів електромеханічного приводу 2.4. Математичний опис електромеханічного приводу 2.5. Розрахунок параметрів системи керування Висновки до розділу 2 Розділ 3. Створення і симуляція моделі електромеханічного приводу промислового маніпуляційного робота 3.1. Вибір програмного середовища для моделювання 3.2. Створення моделі електромеханічного приводу 3.3. Налаштування параметрів моделі системи керування 3.4. Проведення симуляції роботи електромеханічного приводу 3.5. Аналіз результатів моделювання Висновки до розділу 3 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу: Структурна схема промислового маніпуляційного робота з електромеханічним приводом, Функціональна схема системи керування електромеханічним приводом маніпуляційного робота, Математична модель електромеханічного приводу промислового маніпуляційного робота, Імітаційна модель електромеханічного приводу в програмному середовищі моделювання Електрична схема підключення Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15, Результати симуляції роботи електромеханічного приводу, Електрична та механічна моделі керування електроприводу, Блок-схема алгоритму керування Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15, Презентація проєкту.
6. Дата видачі завдання 30 березня 2026 р.

Календарний план

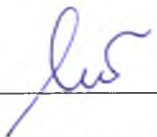
№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	30.03.2026	
2	Огляд і аналіз існуючих систем керування приводами промислових роботів	05.04.2026	
3	Розроблення системи керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота	13.04.2026	
4	Створення і симуляція моделі електромеханічного приводу промислового маніпуляційного робота	10.04.2026	
5	Висновки	28.04.2026	
6	Оформлення пояснювальної записки і ілюстративного матеріалу	20.05.2026	

Студент


(підпис)

Дмитро ШАХРАЙ

Керівник


(підпис)

Сергій ЛІСОВЕЦЬ

АНОТАЦІЯ

Під час виконання дипломної роботи «Розроблення системи керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота» було проведено аналіз існуючих систем керування приводами промислових роботів, що дозволило визначити основні вимоги до побудови системи керування та обрати підхід до її реалізації. Робота складається з трьох розділів: аналітичного, розділу розроблення системи керування та розділу моделювання. Зміст роботи викладено на 87 сторінках, містить 16 рисунків, 12 таблиць, 73 формул, 2 додатків та 40 літературних джерел.

У першому розділі виконано огляд сучасних систем керування електромеханічними приводами промислових роботів, розглянуто їх структуру, принципи роботи, основні вимоги до точності, швидкодії та безпеки.

У другому розділі розроблено систему керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота, визначено її функціональні блоки, описано принцип формування керуючого сигналу та обґрунтовано використання PID-регулювання.

У третьому розділі створено імітаційну модель електромеханічного приводу, проведено симуляцію руху маніпулятора та проаналізовано зміну положення, швидкості, моменту і похибки керування. За результатами моделювання підтверджено працездатність розробленої системи керування.

Ключові слова: промисловий робот, маніпулятор, електромеханічний привод, система керування, PID-регулятор, моделювання.

ANNOTATION

During the completion of the diploma thesis “Development of a Control System for the Electromechanical Drive of an Industrial Manipulator Robot”, an analysis of existing control systems for industrial robot drives was carried out. This made it possible to determine the main requirements for the development of the control system and to choose an appropriate approach for its implementation. The thesis consists of three chapters: an analytical chapter, a chapter on the development of the control system, and a chapter on modelling. The content of the thesis is presented on 87 pages and includes 15 figures, 12 tables, 73 formulas, 2 appendices, and 40 references.

The first chapter provides an overview of modern control systems for electromechanical drives of industrial robots. Their structure, operating principles, and the main requirements for accuracy, response speed, and safety are considered.

The second chapter presents the development of a control system for the electromechanical drive of an industrial manipulator robot. The main functional blocks of the system are defined, the principle of control signal formation is described, and the use of PID control is justified.

The third chapter describes the creation of a simulation model of the electromechanical drive. The motion of the manipulator is simulated, and changes in position, speed, torque, and control error are analyzed. Based on the simulation results, the operability of the developed control system is confirmed.

Keywords: industrial robot, manipulator, electromechanical drive, control system, PID controller, modelling.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРИВОДАМИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ.....	9
1.1. Загальна характеристика промислових роботів та їх приводів	9
1.2. Класифікація приводів промислових роботів	11
1.3. Огляд систем керування електромеханічними приводами.....	14
1.4. Аналіз методів керування приводами маніпуляційних роботів.....	17
Висновки до розділу 1	19
РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯЦІЙНОГО РОБОТА.....	20
2.1. Постановка задачі керування електромеханічним приводом.....	20
2.2. Розроблення структурної схеми системи керування.....	22
2.3. Вибір основних елементів електромеханічного приводу.....	23
2.4. Математичний опис електромеханічного приводу	29
Висновки до розділу 2	40
СТВОРЕННЯ І СИМУЛЯЦІЯ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПРИВОДУ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯЦІЙНОГО РОБОТА.....	51
3.1. Вибір програмного середовища для моделювання	51
3.2. Створення моделі електромеханічного приводу	53
3.3. Налаштування параметрів моделі системи керування	58
3.4. Проведення симуляції електромеханічного приводу	62
3.5. Аналіз результатів моделювання	64
Висновки до розділу 3	65
ВИСНОВКИ.....	67
Додаток А.....	74
Додаток Б	80

ВСТУП

Сучасне промислове виробництво все більше орієнтується на автоматизацію технологічних процесів, підвищення точності виконання операцій та зменшення впливу людського фактора. Одним із найефективніших засобів автоматизації є промислові маніпуляційні роботи, які застосовуються для переміщення деталей, складання виробів, зварювання, пакування, обробки матеріалів та виконання інших повторюваних операцій. Їх використання дозволяє підвищити продуктивність, забезпечити стабільну якість роботи та зменшити ризики, пов'язані з виконанням складних або небезпечних виробничих завдань.

Ефективність роботи промислового маніпулятора значною мірою залежить від якості функціонування його електромеханічних приводів. Саме привод забезпечує переміщення ланок робота, точне позиціонування робочого органу, плавність руху та виконання заданої траєкторії. У процесі роботи на привод впливають інерційні навантаження, тертя, зміна швидкості, прискорення та моменту, тому система керування повинна забезпечувати стійке й точне відпрацювання керуючих сигналів.

Актуальність теми зумовлена необхідністю розроблення надійних систем керування електромеханічними приводами промислових роботів, які здатні забезпечити високу точність, швидкодію та безпечність руху маніпулятора. Недостатньо якісне керування може спричинити похибки позиціонування, коливання, перевантаження механічних вузлів і зниження ефективності роботи роботизованої системи. Тому дослідження та моделювання системи керування приводом є важливим етапом перед її практичним застосуванням.

Метою дипломної роботи є розроблення системи керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота та перевірка її працездатності за допомогою імітаційного моделювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати аналіз існуючих систем керування приводами промислових роботів, розглянути особливості побудови електромеханічного приводу, визначити вимоги до системи керування, розробити

алгоритм керування приводом, створити імітаційну модель роботи системи та провести аналіз отриманих результатів.

Об'єктом дослідження є процес керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота.

Предметом дослідження є система керування електромеханічним приводом промислового маніпулятора, її структура, алгоритми роботи та параметри, що впливають на точність і стабільність руху.

РОЗДІЛ 1.

ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПРИВОДАМИ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

1.1. Загальна характеристика промислових роботів та їх приводів

Промислові роботи є важливою складовою сучасних автоматизованих виробничих систем. Вони призначені для виконання різноманітних технологічних операцій, таких як переміщення деталей, складання, зварювання, фарбування, пакування, сортування, обробка матеріалів та обслуговування технологічного обладнання. Основною перевагою промислових роботів є здатність багаторазово виконувати однакові операції з високою точністю, швидкістю та стабільністю, що дозволяє підвищити продуктивність виробництва і зменшити вплив людського фактора.

Промисловий робот зазвичай складається з механічної частини, системи приводів, системи керування, датчиків зворотного зв'язку та робочого органу. Механічна частина утворює маніпулятор, який складається з ланок і шарнірів.

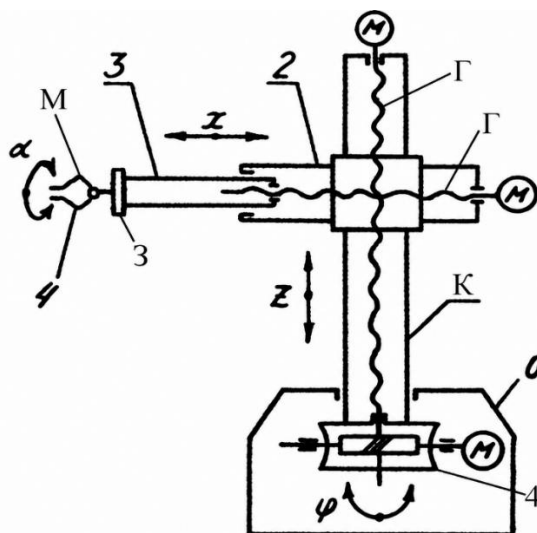


Рис. 1.1 Конструктивна схема промислового робота

$M_1 \dots M_4$ - електродвигуни ; M_5 - пневмопривод ;

Механізми :Черв'ячна передача – Ч; Передача гвинт-гайка – Г; Зубчасті механізми – З; Основа механічної системи – О; Корпус – К; Маніпулятор – М.[1]

Кожна ланка забезпечує переміщення робочого органу у просторі, а кількість ступенів рухомості визначає функціональні можливості робота. Найпоширенішими є шестиосьові промислові маніпулятори, які дозволяють виконувати складні просторові переміщення та забезпечують гнучкість у виконанні технологічних операцій.

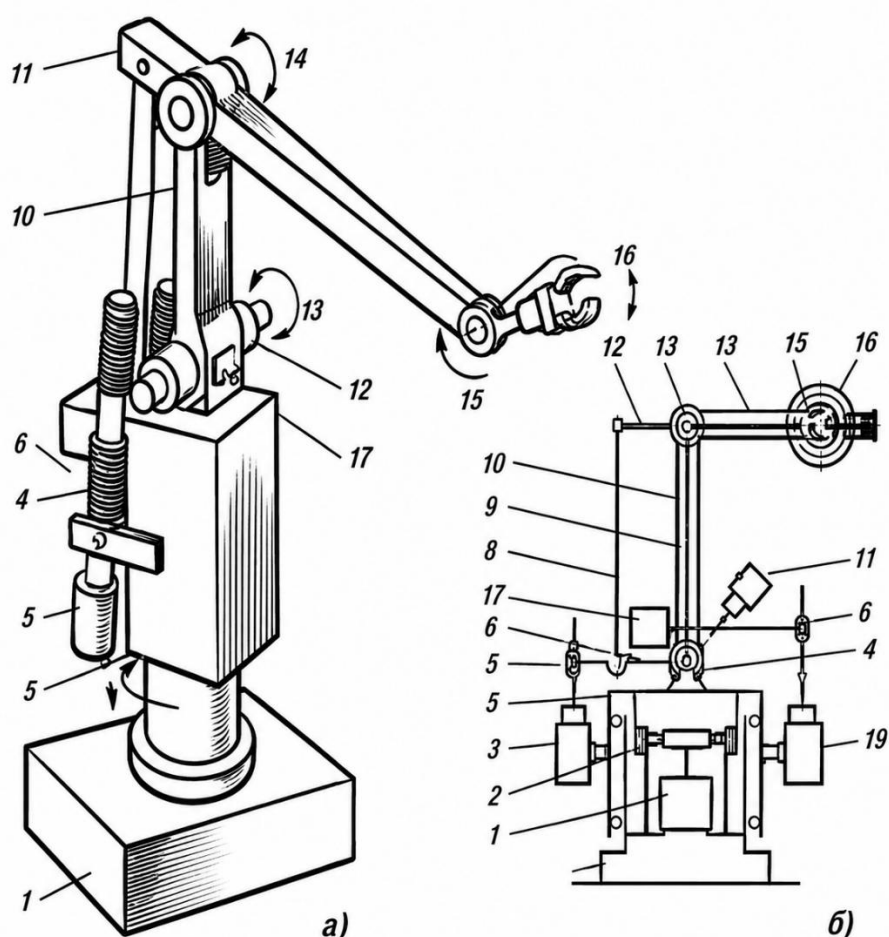


Рис.1.2 Промисловий робот: а)компоновка; б) кінематична схема: 1-основа; 2,4,17,20-електродвигуни з редукторами; 3-хвильова передача; 6,18-кулькові гвинтові пари; 5-поворотний корпус; 7-тяга; 8- зрівноважуючий вантаж; 9,10,12- ланки руки; 11-14-тяги; 13,15,19- кривошипи; 16-конічна передача.[1]

Одним із ключових елементів промислового робота є привод. Привод забезпечує перетворення енергії у механічний рух ланок маніпулятора. Саме від характеристик приводу залежить точність позиціонування, швидкість переміщення, плавність руху, вантажопідйомність і надійність роботи робота. У промислових роботах можуть

використовуватися електричні, гідравлічні та пневматичні приводи. Найбільш поширеними є електромеханічні приводи, оскільки вони мають високу точність керування, компактність, енергоефективність і добре підходять для автоматизованих систем.[2]

Електромеханічний привод промислового робота зазвичай складається з електродвигуна, редуктора, датчика положення, силового перетворювача та системи керування. Електродвигун створює обертальний рух, редуктор передає його на ланку маніпулятора і збільшує крутний момент, а датчик положення забезпечує зворотний зв'язок для контролю фактичного положення осі. Система керування порівнює задане положення з фактичним і формує керуючий сигнал, який дозволяє зменшити похибку та забезпечити точне переміщення.

Для якісної роботи промислового робота система приводів повинна відповідати низці вимог. До основних вимог належать висока точність позиціонування, швидкодія, плавність руху, стійкість до навантажень, надійність, енергоефективність і безпечність роботи. Також важливим є забезпечення синхронної роботи всіх осей маніпулятора, оскільки рух робочого органу формується внаслідок узгодженої роботи кількох приводів одночасно.[3, 4]

Таким чином, промислові роботи є складними мехатронними системами, у яких приводи відіграють визначальну роль у забезпеченні руху, точності та продуктивності. Електромеханічні приводи є найбільш доцільними для використання у промислових маніпуляторах завдяки їхній керованості, точності та можливості інтеграції з сучасними системами автоматичного керування.

1.2 Класифікація приводів промислових роботів

Приводи промислових роботів призначені для перетворення енергії у механічний рух ланок маніпулятора. Вони забезпечують переміщення робочого органу, точне позиціонування, зміну швидкості, створення необхідного зусилля або моменту та виконання заданої траєкторії. Від типу приводу значною мірою залежать технічні характеристики робота, зокрема його вантажопідйомність, швидкодія, точність, плавність руху, енергоефективність і надійність.

Приводи промислових роботів можна класифікувати за видом використовуваної енергії на електричні, гідравлічні та пневматичні. Кожен із цих типів має свої переваги, недоліки та сферу застосування.

Електричні приводи є найбільш поширеними у сучасних промислових роботах. Вони використовують електродвигуни, які перетворюють електричну енергію у механічний рух. До складу електроприводу зазвичай входять електродвигун, редуктор, силовий перетворювач, датчик положення та система керування. Основними перевагами електричних приводів є висока точність позиціонування, простота керування, компактність, енергоефективність, можливість програмного налаштування та зручна інтеграція з автоматизованими системами. Саме тому електромеханічні приводи широко застосовуються у шестиосьових промислових маніпуляторах, складальних роботах, роботах для пакування, сортування та обслуговування верстатів.[5]

Гідравлічні приводи використовують енергію рідини під тиском. Вони здатні створювати великі зусилля та моменти, тому застосовуються у роботах, які працюють із важкими вантажами або виконують силові операції. Перевагами гідравлічних приводів є висока питома потужність, здатність працювати з великими навантаженнями та плавність переміщення. До недоліків належать складність конструкції, необхідність використання гідростанції, можливість витіку робочої рідини, підвищені вимоги до обслуговування та менша зручність керування порівняно з електроприводами.[6,7]

Пневматичні приводи працюють за рахунок енергії стисненого повітря. Вони мають просту конструкцію, невелику вартість, високу швидкодію та можуть використовуватися в умовах, де небажане застосування електричних або гідравлічних систем. Пневматичні приводи часто застосовуються у простих маніпуляторах, захоплювальних пристроях, механізмах подачі, переміщення та фіксації деталей. Основними недоліками пневмоприводів є нижча точність позиціонування, складність плавного регулювання швидкості та обмежена вантажопідйомність.[8]

За характером руху приводи промислових роботів поділяють на обертальні та поступальні. Обертальні приводи забезпечують поворот ланок навколо осі та використовуються у більшості суглобів промислових маніпуляторів. Поступальні приводи забезпечують лінійне переміщення і застосовуються у координатних роботах, підйомних механізмах, напрямних або виконавчих пристроях із прямолінійним рухом.

За способом керування приводи можна поділити на приводи з розімкненою та замкненою системою керування. У розімкненій системі керування рух формується без постійного контролю фактичного положення. Такі системи простіші, але менш точні. У замкненій системі використовується зворотний зв'язок від датчиків положення, швидкості або струму. Система порівнює задане значення з фактичним і коригує керуючий сигнал, що дозволяє підвищити точність та стабільність руху. Саме замкнені системи керування є основою сучасних електромеханічних приводів промислових роботів.[9, 10]

Також приводи класифікують за типом електродвигуна. У промислових роботах можуть використовуватися двигуни постійного струму, асинхронні двигуни, синхронні серводвигуни та крокові двигуни. Найбільш поширеними є серводвигуни, оскільки вони забезпечують високу точність, швидку реакцію на зміну керуючого сигналу та можливість роботи в замкненому контурі керування з використанням еncoderів.

Порівняльна характеристика основних типів приводів промислових роботів наведена в таблиці 1.1.

Отже, вибір типу приводу промислового робота залежить від вимог до точності, швидкості, вантажопідйомності, умов експлуатації та характеру технологічної операції.

Для сучасних промислових маніпуляторів найбільш доцільним є використання електромеханічних приводів, оскільки вони забезпечують точне керування рухом, добре поєднуються із системами автоматичного керування та дозволяють реалізувати складні траєкторії переміщення робочого органу.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика приводів промислових роботів

Тип приводу	Переваги	Недоліки	Сфера застосування
Електричний	Висока точність позиціонування; простота керування; компактність; енергоефективність; зручна інтеграція із системами автоматичного керування.	Обмеження за максимальними зусиллями порівняно з гідравлічними приводами; потреба у якісній системі керування та датчиках зворотного зв'язку.	Шестиосьові промислові маніпулятори; складальні роботи; пакування; сортування; обслуговування верстатів.
Гідравлічний	Можливість створення великих зусиль і моментів; висока питома потужність; плавність руху при значних навантаженнях.	Складність конструкції; потреба в гідростанції; можливість витіку робочої рідини; підвищені вимоги до обслуговування.	Важкі промислові роботи; силові операції; переміщення великих вантажів; роботи у важких умовах експлуатації.
Пневматичний	Проста конструкція; невисока вартість; висока швидкодія; можливість використання у простих автоматизованих системах.	Нижча точність позиціонування; складність плавного регулювання швидкості; обмежена вантажопідйомність.	Захоплювальні пристрої; прості маніпулятори; механізми подачі, фіксації та переміщення деталей.

1.3 Огляд систем керування електромеханічними приводами

Електромеханічні приводи є одними з основних елементів сучасних промислових роботів, оскільки саме вони забезпечують рух ланок маніпулятора, точне позиціонування робочого органу та виконання заданої траєкторії. Для ефективної роботи приводу необхідна система керування, яка формує керуючі сигнали для електродвигуна, контролює параметри руху та забезпечує стабільність роботи всієї механічної системи.[11]

Система керування електромеханічним приводом зазвичай складається із задавального пристрою, регулятора, силового перетворювача, електродвигуна, механічної передачі, датчиків зворотного зв'язку та виконавчого механізму. Задавальний пристрій формує необхідне значення положення, швидкості або моменту. Регулятор порівнює задане значення з фактичним і визначає похибку

керування. На основі цієї похибки формується керуючий сигнал, який через силовий перетворювач подається на електродвигун.

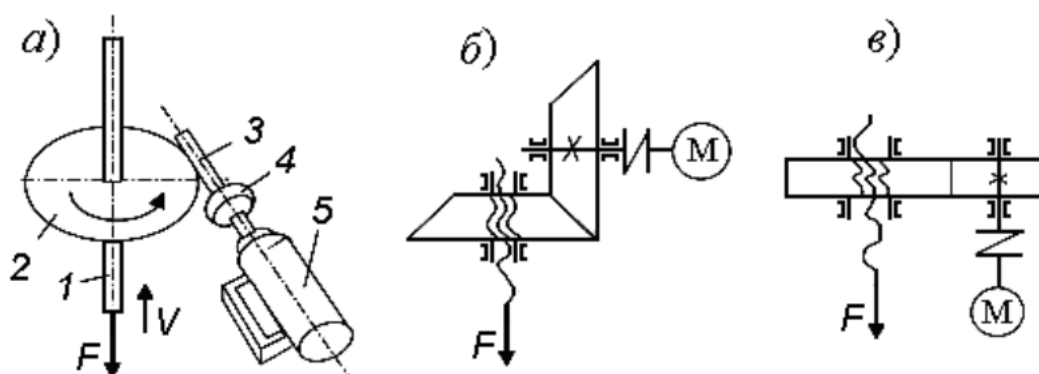


Рис 1.3 Електропривод з гвинтовою передачею:

a – схема з черв'ячним редуктором; *б* – з конічним редуктором;
в – з циліндричним редуктором[15]

У промислових роботах найчастіше застосовуються замкнені системи керування електромеханічними приводами. Їх особливістю є наявність зворотного зв'язку від датчиків положення, швидкості або струму. Завдяки цьому система може постійно контролювати фактичний стан приводу та коригувати його роботу. Такий принцип дозволяє підвищити точність позиціонування, зменшити похибку руху, забезпечити плавність переміщення та стабільність роботи маніпулятора навіть за зміни навантаження.[12]

Найбільш поширеною структурою керування електромеханічним приводом є каскадна система керування. Вона складається з декількох контурів: контуру положення, контуру швидкості та контуру струму або моменту. Зовнішній контур положення відповідає за точне переміщення ланки у задану координату. Контур швидкості забезпечує необхідну динаміку руху, а внутрішній контур струму регулює момент електродвигуна. Така структура дає змогу швидко реагувати на зміну навантаження та забезпечувати точне відпрацювання команд.

Для керування електромеханічними приводами часто використовують PID-регулятори. Вони мають просту структуру, є достатньо надійними та добре підходять

для задач позиційного керування. PID-регулятор формує керуючий сигнал на основі пропорційної, інтегральної та диференціальної складових. Пропорційна складова зменшує поточну похибку, інтегральна усуває статичну похибку, а диференціальна покращує динаміку системи та зменшує коливання. Правильний вибір параметрів PID-регулятора суттєво впливає на точність, швидкодію та стійкість приводу.[13]

Окрім класичних PID-регуляторів, у сучасних системах керування можуть застосовуватися адаптивні, робастні, оптимальні та цифрові методи керування. Адаптивні системи дозволяють змінювати параметри регулятора залежно від умов роботи, наприклад при зміні навантаження або характеристик механічної системи. Робастні системи забезпечують стійкість до зовнішніх збурень і неточностей моделі. Оптимальні методи керування дають змогу обирати режим роботи, який забезпечує мінімальну похибку, енергоспоживання або час переміщення. Однак такі методи є складнішими для реалізації, тому в багатьох промислових системах базовим рішенням залишаються PID-регулятори.[14]

Важливу роль у системах керування електромеханічними приводами відіграють датчики зворотного зв'язку. Для визначення положення осей використовують енкодери або резольвери, для контролю швидкості — тахогенератори або обчислення швидкості за сигналами енкодера, а для контролю навантаження — датчики струму та моменту. Наявність таких датчиків дозволяє системі керування точно визначати поточний стан приводу і своєчасно реагувати на відхилення від заданих параметрів.

Також система керування повинна враховувати обмеження, пов'язані з роботою промислового робота. До таких обмежень належать максимальні кути повороту суглобів, допустимі швидкості, прискорення, моменти, температура двигунів і безпечні межі робочої зони. У разі перевищення допустимих параметрів система має зменшувати швидкість, обмежувати керуючий сигнал або зупиняти рух маніпулятора. Це необхідно для захисту обладнання, забезпечення безпеки оператора та стабільної роботи технологічного процесу.[16]

Отже, системи керування електромеханічними приводами промислових роботів є складними автоматизованими системами, які поєднують електричну, механічну, інформаційну та програмну частини. Найбільш поширеними є замкнені каскадні

системи керування з використанням датчиків зворотного зв'язку та PID-регуляторів. Саме така структура дозволяє забезпечити точність, швидкодію, плавність руху та надійність роботи промислового маніпуляційного робота.

1.4 Аналіз методів керування приводами маніпуляційних роботів

Методи керування приводами маніпуляційних роботів визначають точність позиціонування, швидкодію, плавність руху та стабільність роботи всієї роботизованої системи. Оскільки промисловий маніпулятор має декілька осей, кожна з яких приводиться в рух окремим електромеханічним приводом, система керування повинна забезпечувати узгоджену роботу всіх приводів відповідно до заданої траєкторії.[17]

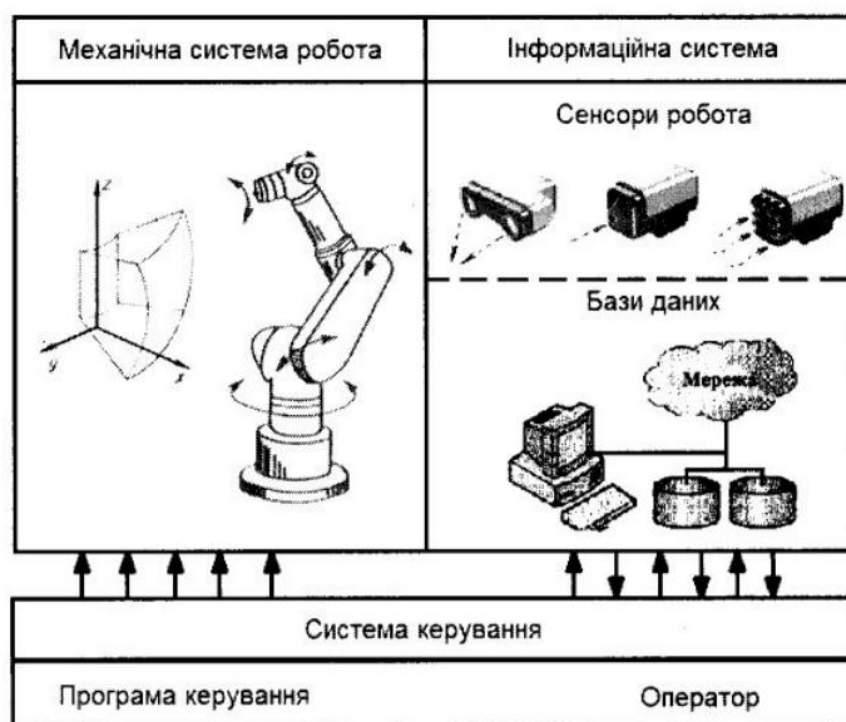


Рис. 1.4 – Схема керування роботів-маніпуляторів[3]

Найпростішим методом є розімкнене керування, за якого керуючий сигнал подається на привод без постійного контролю фактичного положення або швидкості. Такий підхід має просту реалізацію, однак не забезпечує достатньої точності та не

враховує вплив зміни навантаження, тертя й зовнішніх збурень. Тому в промислових маніпуляторах він використовується обмежено.[18, 19]

Більш поширеним є замкнене керування із використанням зворотного зв'язку. У такій системі фактичне положення, швидкість або струм порівнюються із заданими значеннями, після чого регулятор формує сигнал для зменшення похибки. Це дозволяє підвищити точність руху, забезпечити стабільність роботи приводу та компенсувати вплив зовнішніх факторів.

Одним із найпоширеніших методів керування електромеханічними приводами є PID-регулювання. PID-регулятор формує керуючий сигнал на основі пропорційної, інтегральної та диференціальної складових. Пропорційна складова реагує на поточну похибку, інтегральна зменшує статичну похибку, а диференціальна покращує динаміку системи та зменшує коливання. Перевагами PID-регулятора є простота, надійність і зручність реалізації в цифрових системах керування.

У сучасних промислових роботах часто застосовується каскадна система керування, яка містить контур положення, контур швидкості та контур струму або моменту. Зовнішній контур відповідає за точність позиціонування, контур швидкості забезпечує необхідну динаміку руху, а внутрішній контур струму регулює момент електродвигуна. Така структура дозволяє швидко реагувати на зміну навантаження та забезпечувати плавне відпрацювання заданої траєкторії.[20]

Крім класичних методів, можуть застосовуватися адаптивні, робастні, оптимальні та інтелектуальні системи керування. Адаптивні методи дозволяють змінювати параметри регулятора залежно від умов роботи, робастні забезпечують стійкість до збурень, а оптимальні спрямовані на досягнення найкращого результату за вибраним критерієм, наприклад мінімальної похибки або енергоспоживання. Проте такі методи є складнішими у реалізації, тому в багатьох промислових системах основним рішенням залишаються каскадні системи з PID-регуляторами.

Для керування приводами маніпуляційних роботів найбільш доцільним є використання замкнених систем керування зі зворотним зв'язком. Для електромеханічного приводу промислового маніпулятора ефективним рішенням є

каскадна система з PID-регулятором, оскільки вона поєднує простоту реалізації, достатню точність, швидкодію та надійність роботи.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто загальну характеристику промислових роботів та їх приводів, визначено основні складові промислового маніпулятора, а також проаналізовано роль електромеханічного приводу в забезпеченні руху, точності позиціонування та стабільності роботи роботизованої системи. Встановлено, що промислові роботи широко застосовуються у виробництві для автоматизації технологічних процесів, зокрема переміщення деталей, складання, пакування, обслуговування обладнання та виконання повторюваних операцій.

У результаті аналізу класифікації приводів промислових роботів було визначено, що вони можуть бути електричними, гідравлічними та пневматичними. Порівняння цих типів показало, що для сучасних маніпуляційних роботів найбільш доцільним є використання електромеханічних приводів, оскільки вони забезпечують високу точність керування, компактність, енергоефективність, зручність інтеграції із системами автоматичного керування та можливість реалізації складних траєкторій руху.

Також було виконано огляд систем керування електромеханічними приводами та проаналізовано основні методи керування приводами маніпуляційних роботів. Встановлено, що для забезпечення точності та стабільності руху доцільно використовувати замкнені системи керування зі зворотним зв'язком. Найбільш поширеним і практично ефективним рішенням є каскадна система керування з використанням PID-регуляторів, яка дозволяє контролювати положення, швидкість і момент приводу.

Отже, проведений аналіз підтвердив актуальність розроблення системи керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота. Отримані результати є основою для подальшого розроблення структури системи керування, вибору алгоритму керування та створення імітаційної моделі електромеханічного приводу в наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯЦІЙНОГО РОБОТА

2.1 Постановка задачі керування електромеханічним приводом

Задача керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота полягає у забезпеченні точного, плавного та стабільного переміщення ланок робота відповідно до заданої траєкторії. Для цього система керування повинна формувати керуючий сигнал для електродвигуна приводу, контролювати фактичне положення осі та зменшувати похибку між заданим і реальним положенням.

Об'єктом керування є електромеханічний привод однієї з осей промислового робота Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15. До складу такого приводу входять електродвигун, механічна передача, датчик положення та система керування. Вхідним сигналом системи є задане положення або траєкторія руху осі, а вихідним сигналом — фактичне положення ланки маніпулятора. У процесі роботи на привод впливають інерційні навантаження, тертя, зміна маси вантажу та зовнішні збурення.



Рис.2.1 Промисловий робот Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15[36]

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики промислового робота Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15[36]

Параметр	Значення
Серія	RV-CR SERIES
Тип	Вертикальний
Вантажопідйомність, кг	8
Максимальний радіус досяжності, мм	931
Виконання для умов експлуатації	Стандартне
Тип контролера	CR800-CVD
Час циклу, с	0,44
Швидкість, мм/с	10500
Повторюваність, мм	0,02
Спосіб встановлення	На підлогу, стелю або стіну
Ступінь захисту	IP65
Живлення, В змінного струму	1 фаза, 200–230 В
Споживана потужність, ВА	2000
Робочий діапазон осі J1, град	340
Робочий діапазон осі J2, град	220
Робочий діапазон осі J3, град	165
Робочий діапазон осі J4, град	400
Робочий діапазон осі J5, град	240
Робочий діапазон осі J6, град	720

Для ефективного керування необхідно забезпечити виконання таких вимог: мінімізацію похибки позиціонування, обмеження швидкості та прискорення, плавність руху, стійкість системи до зміни навантаження, а також безпечну роботу приводу в межах допустимих параметрів. У разі перевищення допустимих значень система повинна обмежувати керуючий сигнал або зупиняти рух.

Таким чином, основна задача полягає у розробленні замкненої системи керування електромеханічним приводом із використанням зворотного зв'язку. Така система має забезпечувати порівняння заданого та фактичного положення, формування керуючого впливу за допомогою регулятора і стабільне відпрацювання заданої траєкторії руху промислового маніпулятора.

2.2 Розроблення структурної схеми системи керування

Для забезпечення точного та стабільного функціонування промислового маніпуляційного робота Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15 необхідно сформувати структурну схему системи керування, яка відображає взаємодію основних функціональних елементів приводу та засобів керування. Така схема дає змогу наочно подати послідовність проходження керуючих сигналів, енергетичних потоків і зворотного зв'язку в системі.[21]

Основою системи є задавальний пристрій, який формує команду на переміщення робота відповідно до заданої програми руху. Задавальні сигнали можуть надходити від програми керування, оператора або системи вищого рівня автоматизації. Ці сигнали передаються до контролера, який виконує обробку вхідної інформації, порівнює задані та фактичні параметри руху й формує керуючий вплив для приводів окремих осей.[22]

Наступним елементом структурної схеми є серводрайвери або силові перетворювачі. Їх призначення полягає у перетворенні сигналів керування, що надходять від контролера, у сигнали живлення електродвигунів. Саме через серводрайвери забезпечується необхідний режим роботи електромеханічних приводів осей J1–J6.

Електромеханічні приводи створюють механічний рух, який через редуктори передається на ланки маніпулятора. Редуктори забезпечують узгодження швидкості обертання двигунів із необхідними параметрами руху ланок та збільшення крутного моменту. У результаті узгодженої роботи всіх приводів формується рух робочого органу робота, тобто захоплювача або інструмента.

Важливою частиною структурної схеми є система зворотного зв'язку. Для контролю параметрів руху в системі використовуються енкодери положення, датчики швидкості та датчики струму. Вони забезпечують вимірювання фактичного стану приводів і передають відповідну інформацію назад до контролера. Завдяки цьому реалізується замкнена система керування, у якій можливо своєчасно коригувати керуючий сигнал у разі відхилення від заданої траєкторії.

Окремо у структурній схемі враховуються зовнішні збурення та навантаження, які можуть впливати на роботу маніпулятора. До них належать маса переміщуваної деталі, сили різання, вібрації, удари та інші фактори виробничого середовища. Наявність зворотного зв'язку дозволяє частково компенсувати вплив таких збурень і забезпечувати необхідну точність позиціонування.

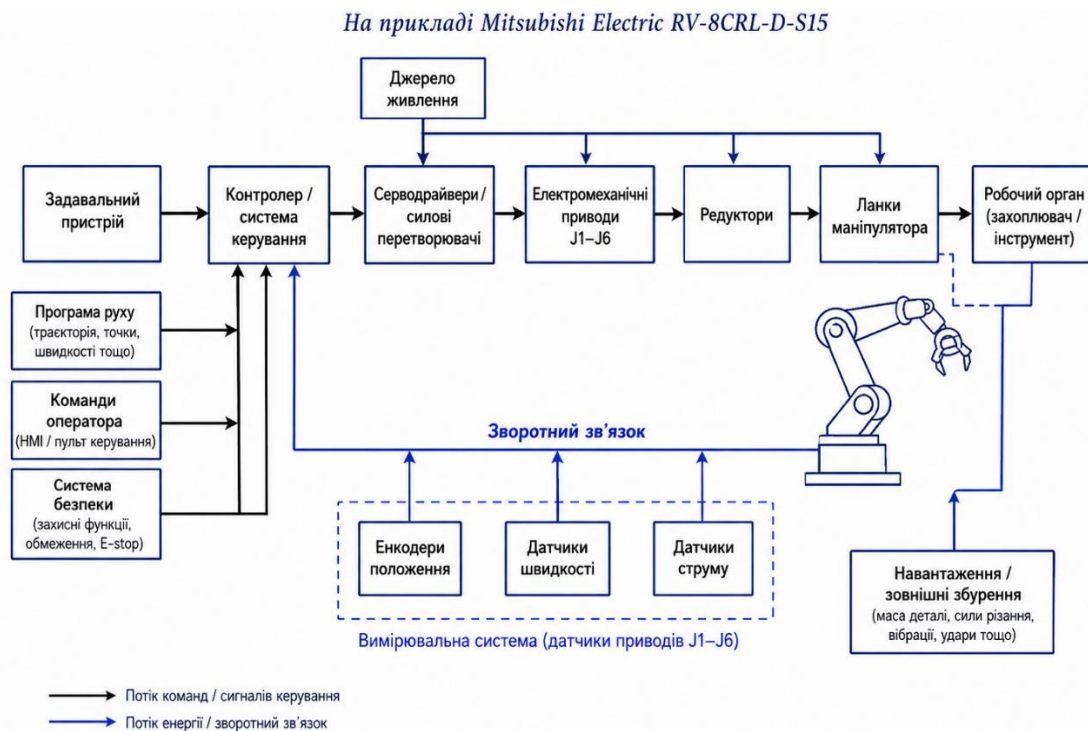


Рис.2.2 Схема керування промислового маніпуляційного робота з електромеханічним приводом(Microsoft Visio)

Таким чином, розроблена структурна схема системи керування включає задавальний пристрій, контролер, серводрайвери, електромеханічні приводи, редуктори, ланки маніпулятора, робочий орган та вимірювальну систему зворотного зв'язку. Така структура є основою для подальшого розроблення алгоритму керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота.

2.3 Вибір основних елементів електромеханічного приводу

Електромеханічний привод промислового маніпуляційного робота є складною технічною системою, яка забезпечує перетворення електричної енергії у механічний рух ланок маніпулятора. До основних елементів такого приводу належать

електродвигуни, серводрайвери, редуктори, датчики зворотного зв'язку, контролер, система живлення та механічна частина виконавчого механізму. Вибір цих елементів безпосередньо впливає на точність позиціонування, швидкодію, плавність переміщення, стабільність відпрацювання траєкторії та надійність роботи промислового робота.[23]

У роботі як об'єкт дослідження обрано промисловий маніпуляційний робот Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15. Це шестиосьовий вертикальний промисловий робот, призначений для виконання операцій переміщення, складання, обслуговування технологічного обладнання та інших автоматизованих виробничих процесів. Основними технічними характеристиками робота є вантажопідйомність 8 кг, максимальний радіус дії 931 мм, повторюваність позиціонування $\pm 0,02$ мм, максимальна швидкість переміщення 10500 мм/с та клас захисту IP65. Такі параметри дозволяють використовувати даний робот у промислових умовах, де необхідні висока точність, достатня швидкодія та стабільна робота приводу.[24]

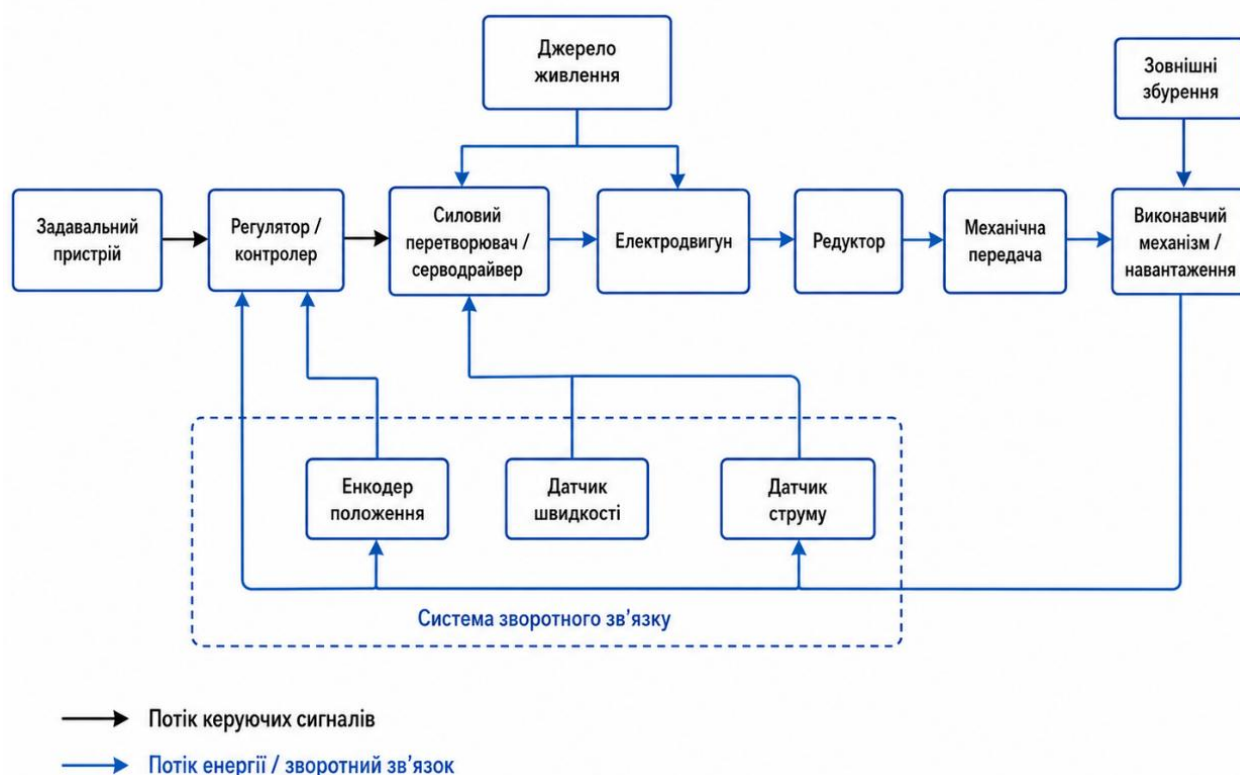


Рис.2.3 Будова електромеханічного приводу(Microsoft Visio)

Як електродвигуни в маніпуляторі Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15 використовуються вбудовані серводвигуни змінного струму, які входять до складу штатних приводів кожної осі робота. Окремий вибір електродвигуна для кожної осі в цьому випадку не виконується, оскільки робот постачається як готова робототехнічна система з уже встановленими серводвигунами, редукторами та датчиками зворотного зв'язку. Використання серводвигунів є доцільним, оскільки вони забезпечують точне керування кутовим положенням, швидкістю і моментом, а також дозволяють реалізувати замкнену систему автоматичного керування.[25]

Силовим перетворювачем у даній системі є штатний серводрайвер, інтегрований у контролер Mitsubishi Electric CR800-CVD. Контролер CR800-CVD виконує функції керування приводами робота, формування команд для серводвигунів, обробки сигналів зворотного зв'язку та контролю стану системи. Він підтримує керування шістьма основними осями маніпулятора та додатковими осями, що дає можливість використовувати його для складних роботизованих систем. Передавання керуючих сигналів до приводів здійснюється через високошвидкісний інтерфейс SSCNET III/H, що забезпечує синхронізовану роботу осей та точне відпрацювання заданої траєкторії.

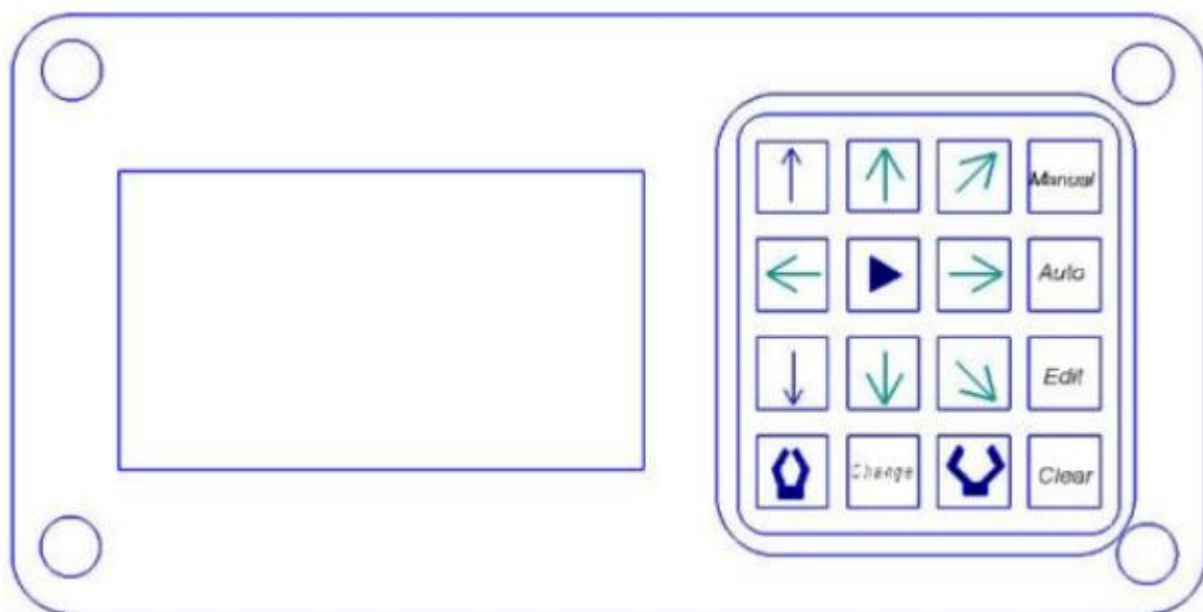


Рис.2.4 Зовнішній вигляд електронного блока керування пристроєм[26]

Для передавання руху від серводвигунів до ланок маніпулятора використовуються штатні високоточні редуктори, встановлені у вузлах робота. Їх основне призначення полягає у зменшенні швидкості обертання та збільшенні крутного моменту на вихідній ланці. Для промислових маніпуляційних роботів важливим є мінімальний люфт редуктора, оскільки навіть незначна похибка у механічній передачі може спричинити зниження точності позиціонування робочого органу. У роботі Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15 редуктори є частиною конструкції маніпулятора, тому їх параметри узгоджені з характеристиками серводвигунів і контролера.

Датчиками зворотного зв'язку в системі є вбудовані енкодери, встановлені у приводах осей робота. Вони забезпечують визначення фактичного кутового положення, швидкості обертання та напрямку руху кожної осі. Сигнали від енкодерів надходять до контролера CR800-CVD, де порівнюються із заданими значеннями. На основі різниці між заданим і фактичним положенням формується керуючий вплив на серводвигун, що дозволяє зменшити похибку позиціонування та забезпечити стабільне відпрацювання траєкторії руху.

Також важливим елементом електромеханічного приводу є **система живлення**. Вона забезпечує подавання електричної енергії до контролера, серводрайверів і приводів. Для стабільної роботи системи живлення повинна відповідати вимогам за напругою, потужністю та захистом від перевантажень. У разі виникнення аварійної ситуації система живлення має забезпечувати безпечне вимкнення приводів.[26]

Для побудови системи керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота основними елементами є серводвигун, серводрайвер, редуктор, енкодер, контролер і система живлення. Їх узгоджена робота забезпечує точне керування рухом ланок маніпулятора, стабільне відпрацювання заданої траєкторії та безпечну експлуатацію роботизованої системи.

Центральним елементом системи керування є контролер Mitsubishi Electric CR800-CVD. Він призначений для керування промисловим роботом RV-8CRL-D-S15, обробки програми руху, сигналів від датчиків, команд оператора та сигналів системи безпеки. Контролер підтримує мову програмування MELFA-BASIC V та MELFA-

BASIC VI, має інтерфейси Ethernet, USB, SSCNET III/H, а також входи та виходи для підключення зовнішніх пристроїв. Для модифікації S15 у контролері передбачено інтерфейсний модуль 2D-TZ378, який використовується для підключення сигналів введення/виведення.

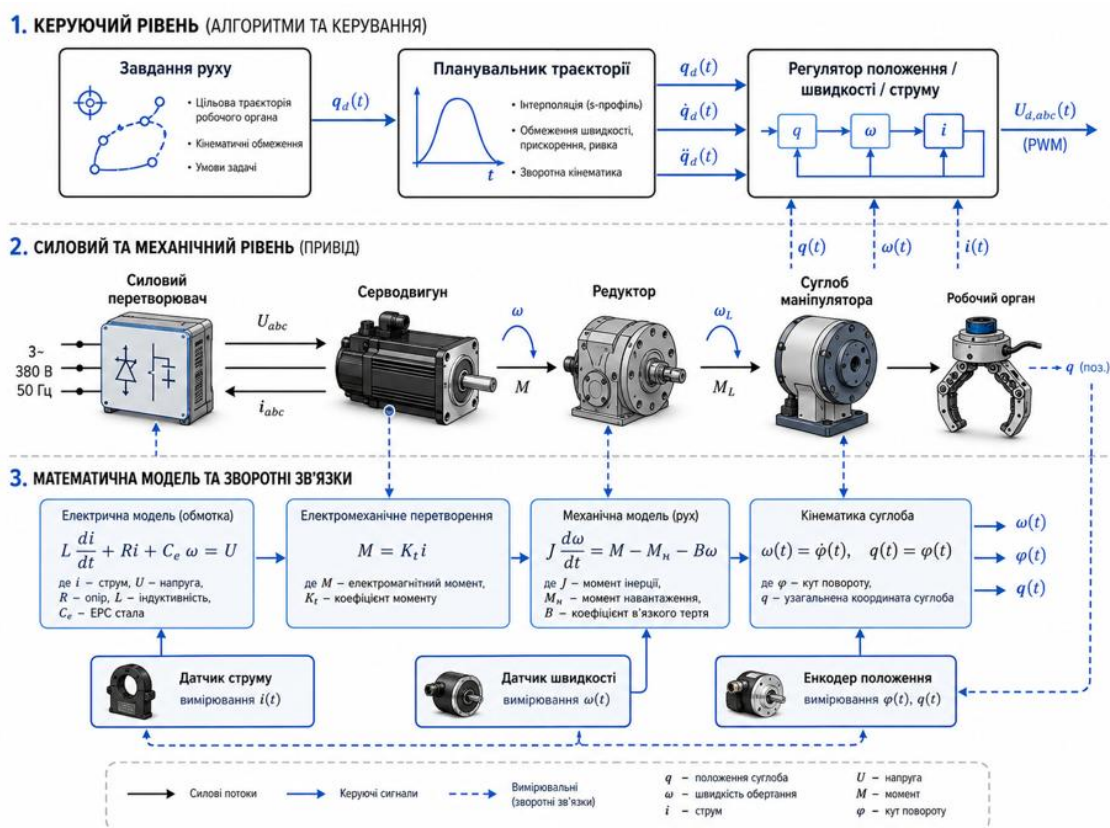


Рис.2.5 Функціональна схема системи керування електромеханічним приводом маніпуляційного робота (Microsoft Visio)

Система живлення вибирається відповідно до вимог робота Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15 та контролера CR800-CVD. Для живлення системи необхідна однофазна мережа змінного струму з напругою 200–230 В АС. Споживана потужність роботизованої системи становить 2000 VA, а рекомендована потужність живлення контролера CR800-CVD — 2,0 kVA. З урахуванням пускових струмів та необхідності забезпечення надійної роботи доцільно передбачити джерело живлення з запасом за потужністю, автоматичний вимикач, захист від перевантаження, захисне заземлення

та аварійне вимкнення живлення приводів. Для кіл керування, зовнішніх датчиків та допоміжних пристроїв може використовуватися джерело постійної напруги 24 В DC.

Таблиця 2.1 — Основні елементи електромеханічного приводу промислового маніпуляційного робота

Елемент системи	Обрана модель або виконання	Основне призначення
Промисловий робот	Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15	Шестиосьовий маніпулятор з вантажопідйомністю 8 кг і радіусом дії 931 мм
Електродвигуни	Вбудовані серводвигуни змінного струму осей робота RV-8CRL-D-S15	Забезпечення обертального руху ланок маніпулятора
Серводрайвер / силовий перетворювач	Штатний приводний блок у складі контролера CR800-CVD	Формування керуючих сигналів для серводвигунів і регулювання струму, швидкості та моменту
Контролер	Mitsubishi Electric CR800-CVD	Керування шістьма осями робота, обробка програми руху та сигналів зворотного зв'язку
Датчики зворотного зв'язку	Вбудовані енкодери приводів осей	Визначення положення, швидкості та напрямку руху осей
Редуктори	Штатні високоточні редуктори у вузлах маніпулятора	Зменшення швидкості обертання та збільшення крутного моменту
Інтерфейс зв'язку з приводами	SSCNET III/H	Синхронізоване передавання команд між контролером і приводами
Модуль введення/виведення	2D-TZ378 для модифікації S15	Підключення зовнішніх сигналів керування
Система живлення	1 фаза 200–230 В AC, 2000 VA; рекомендована потужність контролера 2,0 kVA	Живлення контролера, серводрайверів і приводів робота

Таким чином, для побудови системи керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота обрано готову робототехнічну систему Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15 з контролером CR800-CVD. Такий вибір є доцільним, оскільки всі основні елементи приводу — серводвигуни, серводрайвери, редуктори, енкодери, контролер і система живлення — узгоджені між собою

виробником. Це забезпечує точне керування рухом ланок маніпулятора, стабільну роботу замкненої системи керування, високу повторюваність позиціонування та безпечну експлуатацію роботизованої системи.

2.4 Математичний опис електромеханічного приводу

Електромеханічний привод промислового маніпуляційного робота є автоматизованою системою, яка забезпечує перетворення електричної енергії у керований механічний рух ланок маніпулятора. До складу електромеханічного приводу входять серводрайвер, серводвигун змінного струму, редуктор, механічна частина виконавчого механізму, датчики зворотного зв'язку та контролер. Математичний опис приводу дозволяє встановити залежність між керуючим сигналом, струмами обмоток двигуна, електромагнітним моментом, кутовою швидкістю та положенням ланки маніпулятора.[27]

У даній роботі розглядається електромеханічний привод із серводвигуном змінного струму. Такий двигун працює у складі сервосистеми, де силовий перетворювач формує трифазну систему напруг для обмоток статора. Керування моментом, швидкістю та положенням здійснюється за допомогою серводрайвера, який регулює струми статора двигуна відповідно до команд контролера та сигналів зворотного зв'язку.[28]

Для опису серводвигуна змінного струму використовують рівняння трифазної системи статора. Напруги фаз двигуна можна подати у вигляді:

$$u_a = R_s i_a + d\psi_a/dt, \quad (2.1)$$

$$u_b = R_s i_b + d\psi_b/dt, \quad (2.2)$$

$$u_c = R_s i_c + d\psi_c/dt, \quad (2.3)$$

де u_a, u_b, u_c — фазні напруги статора; i_a, i_b, i_c — фазні струми статора; R_s — активний опір обмотки статора; ψ_a, ψ_b, ψ_c — потокозчеплення фаз статора.

Для трифазної симетричної системи виконується умова:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.4)$$

Фазні напруги також утворюють симетричну трифазну систему:

$$u_a + u_b + u_c = 0. \quad (2.5)$$

Для спрощення математичного опису трифазну систему координат a, b, c перетворюють у двофазну нерухому систему координат α, β . Це перетворення називається перетворенням Кларка. Для струмів воно має вигляд:

$$i_\alpha = i_a \quad (2.6)$$

$$i_\beta = (i_a + 2i_b) / \sqrt{3}. \quad (2.7)$$

Аналогічно для напруг:

$$u_\alpha = u_a, \quad (2.8)$$

$$u_\beta = (u_a + 2u_b) / \sqrt{3}. \quad (2.9)$$

Після цього виконується перехід від нерухомої системи координат α, β до обертової системи координат d, q , яка обертається разом із магнітним полем ротора. Таке перетворення називається перетворенням Парка. Для струмів воно записується так:

$$i_d = i_\alpha \cos\theta_e + i_\beta \sin\theta_e, \quad (2.10)$$

$$i_q = -i_\alpha \sin\theta_e + i_\beta \cos\theta_e, \quad (2.11)$$

де i_d, i_q — складові струму в обертовій системі координат; θ_e — електричний кут положення ротора.

Для напруг перетворення має аналогічний вигляд:

$$u_d = u_\alpha \cos\theta_e + u_\beta \sin\theta_e, \quad (2.12)$$

$$u_q = -u_\alpha \sin\theta_e + u_\beta \cos\theta_e, \quad (2.13)$$

де u_d, u_q — складові напруги статора в обертовій системі координат d, q .

Використання координат d, q дозволяє розділити процес керування магнітним потоком і електромагнітним моментом. У такій системі координат електричні рівняння серводвигуна змінного струму мають вигляд:

$$u_d = R_s i_d + L_d di_d/dt - \omega_e L_q i_q, \quad (2.14)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q di_q/dt + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f, \quad (2.15)$$

де u_d, u_q — складові напруги статора за осями d та q ; i_d, i_q — складові струму статора; R_s — активний опір обмотки статора; L_d, L_q — індуктивності за осями d та

q ; ω_e — електрична кутова швидкість; ψ_f — потокозчеплення постійних магнітів ротора.

Електрична кутова швидкість пов'язана з механічною кутовою швидкістю співвідношенням:

$$\omega_e = p\omega, \quad (2.16)$$

де p — кількість пар полюсів двигуна; ω — механічна кутова швидкість ротора.

Електричний кут положення ротора визначається як:

$$\theta_e = p\theta, \quad (2.17)$$

де θ — механічний кут положення ротора.

У сервоприводах змінного струму для керування моментом використовується моментна складова струму i_q . Складова i_d зазвичай підтримується близькою до нуля, якщо двигун працює без режиму ослаблення поля:

$$i_d \approx 0. \quad (2.18)$$

За цієї умови електромагнітний момент серводвигуна змінного струму визначається рівнянням:

$$M_e = 3/2 \cdot p \cdot \psi_f \cdot i_q, \quad (2.19)$$

де M_e — електромагнітний момент двигуна; p — кількість пар полюсів; ψ_f — потокозчеплення постійних магнітів; i_q — моментна складова струму.

Для зручності це рівняння можна записати через коефіцієнт моменту:

$$M_e = K_t i_q, \quad (2.20)$$

де K_t — коефіцієнт моменту серводвигуна.

Коефіцієнт моменту визначається як:

$$K_t = 3/2 \cdot p \cdot \psi_f. \quad (2.21)$$

Отже, у серводвигуні змінного струму електромагнітний момент прямо пропорційний моментній складовій струму статора. Це дозволяє серводрайверу точно керувати моментом двигуна, а отже, швидкістю та положенням ланки маніпулятора.

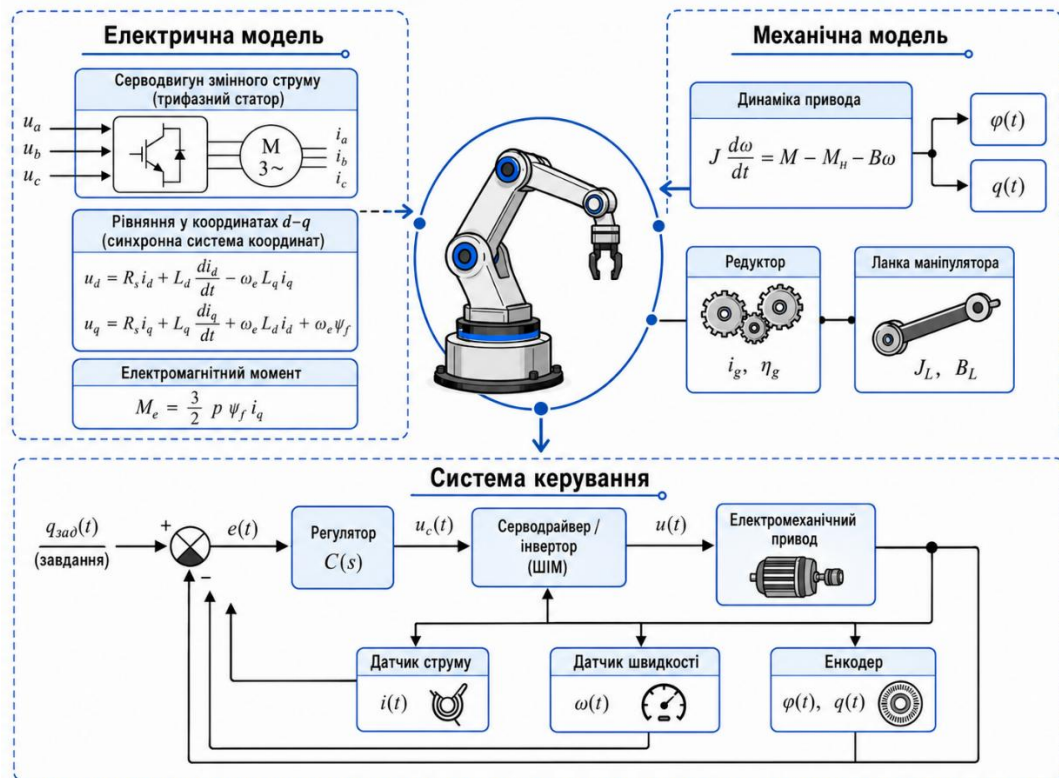


Рис.2.6 Електрична та механічна модель керування електроприводу(Microsoft Visio)

Механічна частина електромеханічного приводу описує обертальний рух ротора двигуна з урахуванням інерції, навантаження та втрат на тертя. Рівняння руху має вигляд:

$$J_{пр} d\omega/dt = M_e - M_H - B\omega, \quad (2.22)$$

де $J_{пр}$ — приведений момент інерції системи; ω — кутова швидкість ротора двигуна; M_e — електромагнітний момент двигуна; M_H — момент навантаження; B — коефіцієнт в'язкого тертя.

З рівняння (2.22) видно, що прискорення вала двигуна залежить від різниці між рушійним електромагнітним моментом і моментами, які протидіють руху. До таких моментів належать момент навантаження, пов'язаний із масою ланки або переміщуваної деталі, а також момент тертя у механічних вузлах.

Кутове положення ротора двигуна визначається через інтегрування кутової швидкості:

$$\theta(t) = \int \omega(t)dt, \quad (2.23)$$

де $\theta(t)$ — механічний кут повороту ротора двигуна; $\omega(t)$ — кутова швидкість ротора.

Оскільки рух від двигуна до ланки маніпулятора передається через редуктор, необхідно врахувати передаточне число редуктора. Якщо i_g — передаточне число редуктора, то кутове положення ланки маніпулятора визначається як:

$$q(t) = \theta(t) / i_g, \quad (2.24)$$

де $q(t)$ — кутове положення ланки маніпулятора; $\theta(t)$ — кутове положення ротора двигуна; i_g — передаточне число редуктора.

Кутова швидкість ланки маніпулятора дорівнює:

$$\omega_l(t) = \omega(t) / i_g, \quad (2.25)$$

де $\omega_l(t)$ — кутова швидкість ланки маніпулятора.

Крутний момент на виході редуктора визначається за формулою:

$$M_{\text{вих}} = M_e i_g \eta_g, \quad (2.26)$$

де $M_{\text{вих}}$ — момент на виході редуктора; M_e — електромагнітний момент двигуна; i_g — передаточне число редуктора; η_g — коефіцієнт корисної дії редуктора.

Приведений момент інерції системи до вала двигуна визначається як:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{дв}} + J_p + J_l / i_g^2, \quad (2.27)$$

де $J_{\text{дв}}$ — момент інерції ротора двигуна; J_p — момент інерції редуктора; J_l — момент інерції ланки маніпулятора; i_g — передаточне число редуктора.

Для реалізації замкненої системи керування використовується зворотний зв'язок за положенням. Фактичне положення ланки вимірюється енкодером, після чого порівнюється із заданим значенням. Похибка керування визначається як:

$$e(t) = q_{\text{зад}}(t) - q(t), \quad (2.28)$$

де $e(t)$ — похибка керування; $q_{\text{зад}}(t)$ — задане положення ланки; $q(t)$ — фактичне положення ланки.

На основі похибки регулятор формує керуючий сигнал для серводрайвера. У системі керування положенням застосовується PID-регулятор, керуючий сигнал якого має вигляд:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d de(t)/dt, \quad (2.29)$$

де K_p — пропорційний коефіцієнт; K_i — інтегральний коефіцієнт; K_d — диференціальний коефіцієнт.

Для побудови передатної функції приводу використовується еквівалентна модель однієї осі маніпулятора. Внутрішні контури регулювання струму та швидкості, які реалізуються серводрайвером, є швидкодіючими, тому зовнішній контур положення можна описати передатною функцією електромеханічного об'єкта:

$$W_{об}(s) = K_{об} / [s(T_m s + 1)], \quad (2.30)$$

де $K_{об}$ — коефіцієнт підсилення об'єкта керування; T_m — електромеханічна стала часу; s — оператор Лапласа.

Параметри $K_{об}$ та T_m визначаються розрахунково. Для цього розглядається найбільш навантажена вісь маніпулятора. Момент навантаження на вихідній ланці визначається за формулою:

$$M_H = mgl, \quad (2.31)$$

де m — маса вантажу; g — прискорення вільного падіння; l — плече дії сили.

Для робота Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15 вантажопідйомність становить:

$$m = 8 \text{ кг.}$$

Максимальний радіус досяжності маніпулятора:

$$l = 0,931 \text{ м.}$$

Прискорення вільного падіння:

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Тоді момент навантаження:

$$M_H = 8 \cdot 9,81 \cdot 0,931 = 73,05 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Для розрахунку параметрів приводу розглядається привод другої осі маніпулятора, оскільки ця вісь є однією з найбільш навантажених під час переміщення ланок робота. Потужність серводвигуна цієї осі становить:

$$P_{дв} = 750 \text{ Вт.}$$

Номінальна швидкість обертання серводвигуна змінного струму:

$$n_{\text{дв}} = 3000 \text{ об/хв.}$$

Кутова швидкість двигуна визначається за формулою:

$$\omega_{\text{дв}} = 2\pi n_{\text{дв}} / 60. \quad (2.32)$$

Після підстановки:

$$\omega_{\text{дв}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 3000 / 60 = 314 \text{ рад/с.}$$

Номінальний момент двигуна:

$$M_{\text{дв}} = P_{\text{дв}} / \omega_{\text{дв}}. \quad (2.33)$$

Після підстановки:

$$M_{\text{дв}} = 750 / 314 = 2,39 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Передаточне число редуктора має забезпечити збільшення моменту двигуна до рівня, необхідного для переміщення ланки маніпулятора. Мінімальне передаточне число визначається як:

$$i_{\text{min}} = M_{\text{н}} / (M_{\text{дв}} \eta_g), \quad (2.34)$$

де η_g — коефіцієнт корисної дії редуктора.

Для високоточного редуктора приймається:

$$\eta_g = 0,9$$

Тоді:

$$i_{\text{min}} = 73,05 / (2,39 \cdot 0,9) = 33,96.$$

Для забезпечення запасу за моментом вводиться коефіцієнт запасу:

$$k_3 = 2.$$

Розрахункове передаточне число з урахуванням запасу:

$$i_{\text{розр}} = k_3 i_{\text{min}}. \quad (2.35)$$

$$i_{\text{розр}} = 2 \cdot 33,96 = 67,92.$$

За результатом розрахунку для моделі вибирається стандартне передаточне число редуктора:

$$i_g = 100.$$

Перевіримо момент на виході редуктора:

$$M_{\text{вих}} = M_{\text{дв}} i_g \eta_g. \quad (2.36)$$

$$M_{\text{вих}} = 2,39 \cdot 100 \cdot 0,9 = 215,1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Отримане значення перевищує момент навантаження:

$$M_{\text{вих}} > M_{\text{н}}.$$

$$215,1 \text{ Н} \cdot \text{м} > 73,05 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Отже, обране передаточне число забезпечує необхідний момент для переміщення ланки маніпулятора із запасом.

Номінальний струм двигуна оцінюється за потужністю трифазного електроприводу:

$$I_{\text{н}} = P_{\text{дв}} / (\sqrt{3} U \eta_{\text{дв}} \cos \varphi), \quad (2.37)$$

де U — лінійна напруга живлення; $\eta_{\text{дв}}$ — ККД двигуна; $\cos \varphi$ — коефіцієнт потужності.

Для розрахунку використовується:

$$U = 230 \text{ В};$$

$$\eta_{\text{дв}} = 0,9;$$

$$\cos \varphi = 0,85.$$

Після підстановки:

$$I_{\text{н}} = 750 / (\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 0,9 \cdot 0,85) = 2,46 \text{ А}.$$

Коефіцієнт моменту двигуна:

$$K_t = M_{\text{дв}} / I_{\text{н}}. \quad (2.38)$$

Після підстановки:

$$K_t = 2,39 / 2,46 = 0,97 \text{ Н} \cdot \text{м/А}.$$

Серводрайвер формує моментну складову струму відповідно до керуючого сигналу. Якщо керуючий сигнал нормований у межах $0 \dots 1$, то коефіцієнт перетворення серводрайвера за струмом дорівнює:

$$K_{i_{\text{д}}} = I_{\text{н}} / u_{\text{max}}. \quad (2.39)$$

Оскільки $u_{\text{max}} = 1$, маємо:

$$K_{i_{\text{д}}} = 2,46 \text{ А}.$$

Коефіцієнт перетворення керуючого сигналу у момент двигуна:

$$K_m = K_t K_{i_{\text{д}}}. \quad (2.40)$$

Після підстановки:

$$K_m = 0,97 \cdot 2,46 = 2,39 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Для визначення приведенного моменту інерції спочатку розраховується момент інерції навантаження на вихідній ланці маніпулятора. Для спрощеного розрахунку вантаж розглядається як зосереджена маса на відстані l від осі обертання:

$$J_l = ml^2. \quad (2.41)$$

Після підстановки:

$$J_l = 8 \cdot 0,931^2 = 6,94 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції навантаження, приведений до вала двигуна:

$$J_{л.пр} = J_l / i_g^2. \quad (2.42)$$

Після підстановки:

$$J_{л.пр} = 6,94 / 100^2 = 0,000694 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції ротора двигуна визначається за наближеною моделлю ротора як циліндричного тіла:

$$J_{дв} = \frac{1}{2} m_p r_p^2 \quad (2.43)$$

де m_p — маса ротора; r_p — радіус ротора.

Для серводвигуна потужністю 750 Вт масу двигуна можна оцінити через питому потужність електродвигуна. Якщо питома потужність становить приблизно 500 Вт/кг, то маса двигуна:

$$m_{дв} = P_{дв} / 500. \quad (2.44)$$

$$m_{дв} = 750 / 500 = 1,5 \text{ кг}.$$

Маса ротора становить приблизно 40 % від маси двигуна:

$$m_p = 0,4 m_{дв}. \quad (2.45)$$

$$m_p = 0,4 \cdot 1,5 = 0,6 \text{ кг}.$$

Радіус ротора для двигуна такої потужності:

$$r_p = 0,04 \text{ м}.$$

Тоді момент інерції ротора:

$$J_{дв} = 1/2 \cdot 0,6 \cdot 0,04^2 = 0,00048 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Момент інерції редуктора, приведений до вала двигуна, оцінюється як частина моменту інерції ротора двигуна:

$$J_p = 0,4J_{дв}. \quad (2.46)$$

$$J_p = 0,4 \cdot 0,00048 = 0,000192 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Загальний приведений момент інерції системи:

$$J_{пр} = J_{дв} + J_p + J_{л.пр} \quad (2.47)$$

Після підстановки:

$$J_{пр} = 0,00048 + 0,000192 + 0,000694 = 0,001366 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Коефіцієнт в'язкого тертя визначається через втрати моменту в приводі. Втрати моменту на валу двигуна можна оцінити за ККД редуктора:

$$M_{втр} = (1 - \eta_g)M_{дв} \quad (2.48)$$

Після підстановки:

$$M_{втр} = (1 - 0,9) \cdot 2,39 = 0,239 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Коефіцієнт в'язкого тертя:

$$B = M_{втр} / \omega_{дв} \quad (2.49)$$

Після підстановки:

$$B = 0,239 / 314 = 0,000761 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}.$$

Електромеханічна стала часу об'єкта керування визначається як:

$$T_m = J_{пр} / B \quad (2.50)$$

Після підстановки:

$$T_m = 0,001366 / 0,000761 = 1,80 \text{ с}.$$

Коефіцієнт підсилення об'єкта керування визначається як:

$$K_{об} = K_m / (i_g B) \quad (2.51)$$

Після підстановки:

$$K_{об} = 2,39 / (100 \cdot 0,000761) = 31,41.$$

Отже, параметри еквівалентної передатної функції електромеханічного приводу становлять:

$$T_m = 1,80 \text{ с};$$

$$K_{об} = 31,41.$$

Тоді передатна функція об'єкта керування набуває вигляду:

$$W_{об}(s) = 31,41 / [s(1,80s + 1)]. \quad (2.52)$$

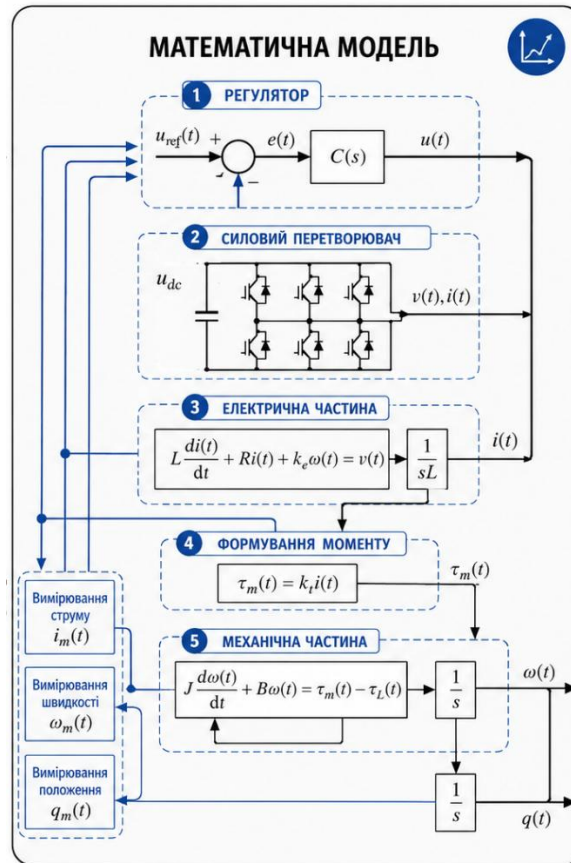


Рис.2.7 Математична модель електромеханічного приводу промислового маніпуляційного робота (Microsoft Visio)

Структурна схема системи керування включає задавальний сигнал, суматор похибки, PID-регулятор, серводрайвер, серводвигун змінного струму, редуктор, механічну ланку та енкодер зворотного зв'язку.

Передатна функція PID-регулятора записується у вигляді:

$$W_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.52)$$

У вигляді одного дробу:

$$W_{PID}(s) = (K_d s^2 + K_p s + K_i) / s \quad (2.53)$$

Розімкнена передатна функція системи визначається як добуток передатної функції регулятора та об'єкта керування:

$$W_p(s) = W_{PID}(s)W_{об}(s) \quad (2.54)$$

Після підстановки:

$$W_p(s) = 31,41(K_d s^2 + K_p s + K_i) / [s^2(1,80s + 1)] \quad (2.55)$$

Замкнена передатна функція системи при одиничному зворотному зв'язку має вигляд:

$$W_z(s) = W_p(s) / [1 + W_p(s)] \quad (2.56)$$

Отже, математична модель електромеханічного приводу промислового маніпуляційного робота включає електричні рівняння серводвигуна змінного струму в координатах d–q, рівняння електромагнітного моменту, механічне рівняння руху, модель редуктора, зворотний зв'язок за положенням і передатну функцію замкненої системи керування.

2.5 Розрахунок параметрів системи керування

Основною задачею автоматизованої системи керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота є забезпечення точного, швидкого та стійкого переміщення ланки маніпулятора у задане положення. Для цього необхідно визначити параметри регулятора, які забезпечують потрібну якість перехідного процесу. До таких параметрів належать коефіцієнти K_p , K_i та K_d PID-регулятора. [28]

Для системи керування положенням обрано PID-регулятор. Такий вибір пояснюється тим, що система позиційного керування повинна одночасно забезпечувати високу швидкодію, малу статичну похибку та достатнє демпфування коливань. Пропорційна складова регулятора реагує на поточне значення похибки та підвищує швидкодію системи. Інтегральна складова накопичує похибку в часі та забезпечує усунення статичної похибки. Диференціальна складова реагує на швидкість зміни похибки, покращує демпфування та зменшує перерегулювання. [29]

П-регулятор має просту структуру, однак він не забезпечує повного усунення статичної похибки при наявності навантаження. ПІ-регулятор усуває статичну похибку, але може збільшувати перерегулювання та час встановлення. PID-регулятор поєднує переваги пропорційного, інтегрального і диференціального законів керування, тому є доцільним для системи позиційного керування електромеханічним

приводом. ПІД2-регулятор має складнішу структуру та використовується у більш складних системах із розширеним урахуванням нелінійностей, тому для розрахункової моделі однієї осі маніпулятора достатньо класичного PID-регулятора. [30]

Порівняння типів регуляторів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Порівняння типів регуляторів для системи керування положенням

Тип регулятора	Переваги	Недоліки	Висновок
П-регулятор	Простий у реалізації, забезпечує швидку реакцію	Не усуває статичну похибку	Не забезпечує потрібну точність позиціонування
ПІ-регулятор	Усуває статичну похибку	Може збільшувати перерегулювання та час регулювання	Може застосовуватись, але має гірші динамічні властивості
PID-регулятор	Забезпечує швидкодію, усунення статичної похибки та демпфування коливань	Потребує розрахунку трьох коефіцієнтів	Обраний для даної системи
ПІД2-регулятор	Може покращувати якість керування у складних системах	Має складнішу структуру та потребує детальнішої моделі	Не використовується для спрощеної моделі однієї осі

Для розрахунку параметрів системи керування задаються вимоги до якості перехідного процесу:

перерегулювання $\sigma \leq 10\%$;

час регулювання $t_p \leq 0,8$ с;

статична похибка $e_{ст} \rightarrow 0$;

процес має бути стійким і достатньо плавним.

Об'єкт керування описується передатною функцією:

$$W_{об}(s) = 31,41 / [s(1,80s + 1)] \quad (2.55)$$

Передатна функція PID-регулятора:

$$W_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.52)$$

У вигляді одного дробу:

$$W_{PID}(s) = (K_d s^2 + K_p s + K_i) / s \quad (2.53)$$

Розімкнена передатна функція системи:

$$W_p(s) = W_{PID}(s)W_{об}(s) \quad (2.54)$$

Після підстановки передатної функції об'єкта:

$$W_p(s) = 31,41(K_d s^2 + K_p s + K_i) / [s^2(1,80s + 1)] \quad (2.55)$$

Характеристичне рівняння замкненої системи визначається з умови:

$$[1 + W_p(s)] = 0.$$

Після підстановки:

$$1 + 31,41(K_d s^2 + K_p s + K_i) / [s^2(1,80s + 1)] = 0.$$

Після множення на знаменник:

$$s^2(1,80s + 1) + 31,41(K_d s^2 + K_p s + K_i) = 0.$$

Розкриємо дужки:

$$1,80s^3 + s^2 + 31,41K_d s^2 + 31,41K_p s + 31,41K_i = 0.$$

Після зведення подібних членів:

$$1,80s^3 + (1 + 31,41K_d)s^2 + 31,41K_p s + 31,41K_i = 0.$$

Поділимо рівняння на 1,80:

$$s^3 + [(1 + 31,41K_d) / 1,80]s^2 + [31,41K_p / 1,80]s + [31,41K_i / 1,80] = 0.$$

Для визначення коефіцієнтів PID-регулятора використовується метод розміщення полюсів. Задані вимоги до перерегулювання та часу регулювання дозволяють сформулювати бажане характеристичне рівняння замкненої системи. [31]

Перерегулювання для системи другого порядку визначається за формулою:

$$\sigma = e^{[-\pi\zeta / \sqrt{(1 - \zeta^2)}]} \cdot 100 \% \quad (2.57)$$

де ζ — коефіцієнт демпфування.

Щоб забезпечити перерегулювання не більше 10 %, приймаємо:

$$\zeta = 0,6.$$

Час регулювання для критерію 5 % приблизно визначається:

$$t_p \approx 3 / (\zeta\omega_n), \quad (2.58)$$

де ω_n — власна частота системи.

Із заданої умови $t_p \leq 0,8$ с отримаємо:

$$\omega_n \geq 3 / (\zeta t_p) \quad (2.59)$$

Після підстановки числових значень:

$$\omega_n \geq 3 / (0,6 \cdot 0,8).$$

$$\omega_n \geq 6,25 \text{ рад/с.}$$

Для забезпечення запасу за швидкодією використовується:

$$\omega_n = 7 \text{ рад/с.}$$

Бажана пара комплексно-спряжених полюсів визначається як:

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}. \quad (2.60)$$

Підставимо $\zeta = 0,6$ та $\omega_n = 7$ рад/с:

$$s_{1,2} = -0,6 \cdot 7 \pm j \cdot 7\sqrt{1 - 0,6^2}.$$

$$s_{1,2} = -4,2 \pm j5,6.$$

Оскільки характеристичне рівняння системи є рівнянням третього порядку, необхідно задати третій полюс. Його розміщують лівіше від домінуючої пари комплексних полюсів, щоб він не погіршував основну динаміку перехідного процесу.х [32]

Приймаємо:

$$s_3 = -20.$$

Тоді бажане характеристичне рівняння має вигляд:

$$(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)(s + 20) = 0. \quad (2.61)$$

Підставимо числові значення:

$$(s^2 + 8,4s + 49)(s + 20) = 0.$$

Розкриємо дужки:

$$s^3 + 20s^2 + 8,4s^2 + 168s + 49s + 980 = 0.$$

Після зведення подібних членів:

$$s^3 + 28,4s^2 + 217s + 980 = 0.$$

Порівняємо бажане характеристичне рівняння з характеристичним рівнянням замкненої системи:

$$s^3 + [(1 + 31,41K_d) / 1,80]s^2 + [31,41K_p / 1,80]s + [31,41K_i / 1,80] = 0.$$

Отримаємо систему рівнянь:

$$(1 + 31,41K_d) / 1,80 = 28,4,$$

$$31,41K_p / 1,80 = 217,$$

$$31,41K_i / 1,80 = 980.$$

З першого рівняння:

$$1 + 31,41K_d = 28,4 \cdot 1,80.$$

$$1 + 31,41K_d = 51,12.$$

$$31,41K_d = 50,12.$$

$$K_d = 50,12 / 31,41.$$

$$K_d = 1,60.$$

З другого рівняння:

$$K_p = 217 \cdot 1,80 / 31,41.$$

$$K_p = 12,44.$$

З третього рівняння:

$$K_i = 980 \cdot 1,80 / 31,41.$$

$$K_i = 56,16.$$

Отже, розраховані коефіцієнти PID-регулятора становлять:

$$K_p = 12,44;$$

$$K_i = 56,16;$$

$$K_d = 1,60.$$

Передатна функція PID-регулятора після підстановки коефіцієнтів:

$$W_{PID}(s) = 12,44 + 56,16/s + 1,60s. \quad (2.62)$$

У вигляді одного дробу:

$$W_{PID}(s) = (1,60s^2 + 12,44s + 56,16) / s. \quad (2.63)$$

Розімкнена передатна функція системи:

$$W_p(s) = 31,41(1,60s^2 + 12,44s + 56,16) / [s^2(1,80s + 1)]. \quad (2.64)$$

Замкнена передатна функція системи:

$$W_3(s) = \frac{31,41(1,60s^2 + 12,44s + 56,16)}{[1,80s^3 + 51,12s^2 + 390,73s + 1763,99]}. \quad (2.65)$$

Після нормування знаменника:

$$W_3(s) = \frac{31,41(1,60s^2 + 12,44s + 56,16)}{[1,80(s^3 + 28,4s^2 + 217s + 980)]}. \quad (2.66)$$

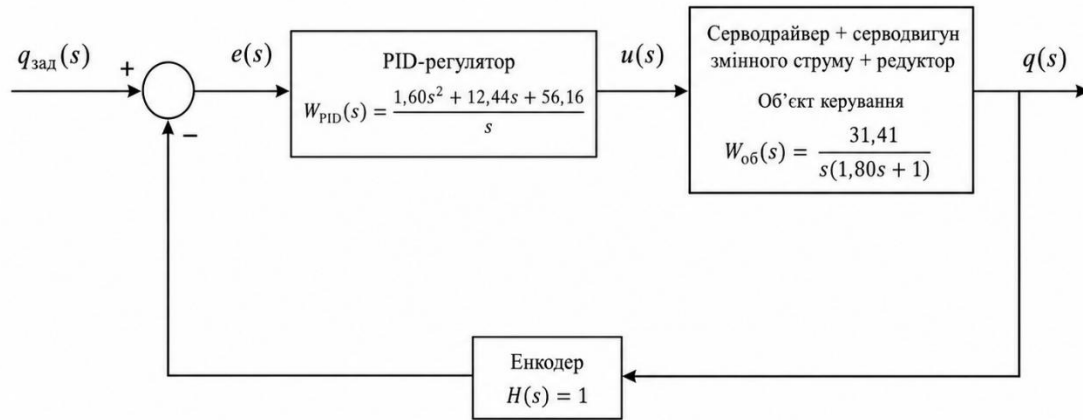


Рис.2.8 Структурна схема системи керування підрегулятором

Отримане характеристичне рівняння відповідає бажаному рівнянню:

$$s^3 + 28,4s^2 + 217s + 980 = 0. \quad (2.67)$$

Отже, розраховані значення $K_p = 12,44$, $K_i = 56,16$ та $K_d = 1,60$ забезпечують розміщення полюсів замкненої системи у заданих точках:

$$s_{1,2} = -4,2 \pm j5,6;$$

$$s_3 = -20.$$

Усі полюси мають від'ємні дійсні частини, тому замкнена система є стійкою.

Для додаткової перевірки стійкості використовується критерій Гурвіца.

Характеристичне рівняння третього порядку має вигляд:

$$a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0 = 0.$$

Для отриманої системи:

$$1,80s^3 + 51,12s^2 + 390,73s + 1763,99 = 0.$$

Коефіцієнти рівняння:

$$a_3 = 1,80;$$

$$a_2 = 51,12;$$

$$a_1 = 390,73;$$

$$a_0 = 1763,99.$$

Для системи третього порядку умова стійкості має вигляд:

$$a_2 a_1 > a_3 a_0.$$

Підставимо числові значення:

$$51,12 \cdot 390,73 > 1,80 \cdot 1763,99.$$

$$19973,94 > 3175,18.$$

Умова виконується, отже система є стійкою.

Орієнтовний час регулювання визначається за формулою:

$$t_p \approx 3 / (\zeta \omega_n), \quad (2.58)$$

Після підстановки:

$$t_p \approx 3 / (0,6 \cdot 7).$$

$$t_p \approx 0,714 \text{ с.}$$

Отримане значення менше заданого граничного часу 0,8 с, тому вимога за швидкодією виконується.

Перерегулювання визначається за формулою:

$$\sigma = e^{-\pi \zeta / \sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot 100 \%. \quad (2.68)$$

Підставимо $\zeta = 0,6$:

$$\sigma = e^{-\pi \cdot 0,6 / \sqrt{1 - 0,6^2}} \cdot 100 \%.$$

$$\sigma = 9,48 \%.$$

Отримане перерегулювання не перевищує 10 %, тому вимога до якості перехідного процесу виконується.

Для оцінки роботи системи задається ступінчаста зміна положення ланки на 30° .

Перехід від градусів до радіанів виконується за формулою:

$$q_{\text{зад}} = q_{\text{град}} \cdot \pi / 180^\circ. \quad (2.69)$$

Для кута 30° :

$$q_{\text{зад}} = 30 \cdot \pi / 180 = 0,524 \text{ рад.}$$

Під час подання результатів моделювання доцільно використовувати градуси, оскільки кутові переміщення ланок маніпулятора зручніше аналізувати саме в градусах. Максимальне значення кута з урахуванням перерегулювання визначається як:

$$q_{max} = q_{зад} \left(1 + \frac{\sigma}{100}\right). \quad (2.70)$$

Після підстановки:

$$q_{max} = 30(1 + 9,48/100).$$

$$q_{max} = 32,84^\circ.$$

Статична похибка системи з інтегральною складовою PID-регулятора при ступінчастому входному сигналі прямує до нуля:

$$e_{ст} \rightarrow 0.$$

Основні розраховані параметри електромеханічного приводу наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 — Розраховані параметри електромеханічного приводу

Параметр	Позначення	Розраховане значення
Момент навантаження	Мн	73,05 Н·м
Номінальна кутова швидкість двигуна	$\omega_{дв}$	314 рад/с
Номінальний момент двигуна	Мдв	2,39 Н·м
Мінімальне передаточне число	i_{min}	33,96
Розрахункове передаточне число із запасом	$i_{розр}$	67,92
Обране передаточне число	i_g	100
Момент на виході редуктора	Мвих	215,1 Н·м
Номінальний струм двигуна	Ін	2,46 А
Коефіцієнт моменту	Кt	0,97 Н·м/А
Коефіцієнт перетворення керуючого сигналу у момент	Кm	2,39 Н·м
Момент інерції навантаження	Јл	6,94 кг·м ²
Приведений момент інерції навантаження	Јл.пр	0,000694 кг·м ²
Момент інерції ротора двигуна	Јдв	0,00048 кг·м ²
Момент інерції редуктора	Јр	0,000192 кг·м ²
Загальний приведений момент інерції	Јпр	0,001366 кг·м ²
Коефіцієнт в'язкого тертя	В	0,000761 Н·м·с/рад
Електромеханічна стала часу	Тm	1,80 с
Коефіцієнт підсилення об'єкта	Коб	31,41

Таблиця 2.3 — Розраховані коефіцієнти PID-регулятора

Коефіцієнт	Позначення	Розраховане значення	Призначення
Пропорційний коефіцієнт	K _p	12,44	Визначає реакцію системи на поточну похибку
Інтегральний коефіцієнт	K _i	56,16	Забезпечує усунення статичної похибки
Диференціальний коефіцієнт	K _d	1,60	Покращує демпфування та зменшує перерегулювання

Таблиця 2.4 — Розраховані показники якості системи керування

Показник	Позначення	Задане значення	Розраховане значення	Висновок
Кут заданого переміщення	q _{зад}	30°	30°	Виконується
Коефіцієнт демпфування	ζ	не менше 0,6	0,6	Виконується
Власна частота	ω _n	не менше 6,25 рад/с	7 рад/с	Виконується
Час регулювання	t _p	не більше 0,8 с	0,714 с	Виконується
Перерегулювання	σ	не більше 10 %	9,48 %	Виконується
Максимальний кут	q _{тах}	не більше 33°	32,84°	Виконується
Статична похибка	ест	наближається до 0	ест → 0	Виконується

Таблиця 2.5 — Орієнтовні значення перехідного процесу системи керування

Час, с	Кут повороту ланки, град	Похибка, град
0,0	0,0	30,0
0,1	8,5	21,5
0,2	20,4	9,6
0,3	29,1	0,9
0,4	32,6	-2,6
0,5	32,1	-2,1
0,6	30,9	-0,9
0,7	30,2	-0,2
0,8	30,0	0,0
1,0	30,0	0,0

Наведені значення показують, що система досягає заданого положення приблизно за 0,7–0,8 с, а максимальне перерегулювання не перевищує заданого обмеження. Це підтверджує відповідність розрахованих коефіцієнтів PID-регулятора вимогам до якості керування.

Для реалізації моделі у програмному середовищі моделювання використовується структурна схема з передатними функціями. Вона включає задавальний сигнал $q_{\text{зад}}$, суматор похибки, PID-регулятор, модель електромеханічного приводу, редуктор, механічну ланку та одиничний зворотний зв'язок за положенням.

У структурній схемі використовуються такі передатні функції:

$$W_{PID}(s) = (1,60s^2 + 12,44s + 56,16) / s; \quad (2.71)$$

$$W_{об}(s) = 31,41 / [s(1,80s + 1)]; \quad (2.72)$$

$$W_3(s) = \frac{31,41(1,60s^2 + 12,44s + 56,16)}{[1,80s^3 + 51,12s^2 + 390,73s + 1763,99]}. \quad (2.73)$$

Результати аналітичного розрахунку необхідно підтвердити під час моделювання. Під час моделювання слід отримати перехідний процес у градусах, порівняти його з розрахунковими значеннями та подати результати у вигляді графіка й таблиці. Якщо графік моделювання має близькі значення часу регулювання, перерегулювання та статичної похибки, це підтверджує правильність виконаного розрахунку параметрів системи керування.

Таким чином, у підрозділі виконано розрахунок параметрів системи керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота. На основі математичної моделі серводвигуна змінного струму, механічної частини приводу та редуктора було визначено параметри об'єкта керування $K_{об} = 31,41$ та $T_m = 1,80$ с. Після цього методом розміщення полюсів розраховано коефіцієнти PID-регулятора: $K_p = 12,44$, $K_i = 56,16$, $K_d = 1,60$. Отримані значення забезпечують час регулювання приблизно 0,714 с, перерегулювання близько 9,48 % та нульову статичну похибку при ступінчастому задавальному впливі. Отримані результати використовуються для подальшої побудови імітаційної моделі електромеханічного приводу та перевірки правильності розрахунків у середовищі моделювання.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було розглянуто промисловий маніпуляційний робот Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15, який використовується як об'єкт дослідження в даній роботі. На основі його технічних характеристик визначено основні параметри, необхідні для розроблення системи керування електромеханічним приводом, зокрема вантажопідйомність, радіус досяжності, кількість осей, тип контролера та потужність двигунів окремих осей.

Було сформульовано задачу керування електромеханічним приводом, яка полягає у забезпеченні точного, плавного та стабільного переміщення ланок маніпулятора відповідно до заданої траєкторії. Визначено, що для ефективної роботи приводу необхідно використовувати замкнену систему керування зі зворотним зв'язком, яка дозволяє порівнювати задане та фактичне положення осі й коригувати керуючий сигнал у разі виникнення похибки.

У розділі було розроблено структурну та функціональну схеми системи керування електромеханічним приводом маніпуляційного робота. Розглянуто взаємодію основних елементів системи: задавального пристрою, контролера, серводрайвера, електродвигуна, редуктора, ланки маніпулятора, робочого органу та датчиків зворотного зв'язку. Також було визначено основні елементи електромеханічного приводу та обґрунтовано доцільність використання серводвигуна, редуктора, енкодера, датчиків швидкості й струму.

Окремо було виконано математичний опис електромеханічного приводу, у якому враховано електричну частину двигуна, формування електромагнітного моменту, механічну частину приводу, вплив редуктора та роботу системи зворотного зв'язку. Наведені рівняння дозволяють описати зв'язок між напругою,

РОЗДІЛ 3

СТВОРЕННЯ І СИМУЛЯЦІЯ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПРИВОДУ ПРОМИСЛОВОГО МАНІПУЛЯЦІЙНОГО РОБОТА

3.1 Вибір програмного середовища для моделювання

Для дослідження роботи системи керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота необхідно обрати програмні середовища, які дозволяють виконати як імітаційне моделювання системи, так і реалізацію алгоритму керування для подальшого використання в реальній системі автоматизації. Оскільки електромеханічний привод поєднує електричну, механічну та керуючу частини, програмне середовище для моделювання повинно забезпечувати зручне подання таких систем у вигляді структурних або функціональних схем, а середовище для реалізації алгоритму має підтримувати програмування логіки керування промисловим обладнанням [32].

Для створення імітаційної моделі системи керування електромеханічним приводом доцільно використати середовище MATLAB/Simulink (<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>). MATLAB є програмним середовищем для математичних розрахунків, аналізу даних і побудови графіків, а Simulink дозволяє створювати імітаційні моделі динамічних систем у вигляді блок-схем. Такий підхід є зручним для дослідження електроприводів, систем автоматичного керування, механічних об'єктів і робототехнічних систем.

Перевагою Simulink є можливість будувати модель з окремих функціональних блоків: задавального сигналу, суматора, PID-регулятора, електродвигуна, редуктора, ланки маніпулятора, датчиків та зворотного зв'язку. Це дозволяє наочно відобразити структуру системи керування та простежити проходження сигналів від заданого положення до фактичного руху ланки робота. Крім того, у Simulink можна задавати передатні функції елементів приводу, змінювати параметри моделі та спостерігати, як це впливає на точність і швидкодію системи [33].

Для даної роботи MATLAB/Simulink обрано як середовище саме для імітаційного моделювання, оскільки воно дає змогу дослідити перехідні процеси в електромеханічному приводі без використання реального обладнання. Це особливо важливо для промислового робота, оскільки попередня перевірка моделі дозволяє зменшити ризик помилок під час налаштування реальної системи. У середовищі моделювання можна перевірити реакцію приводу на зміну заданого положення, оцінити похибку керування, проаналізувати зміну швидкості, струму, моменту та вплив параметрів PID-регулятора.

Також MATLAB/Simulink дозволяє будувати графіки результатів моделювання, що є зручним для подальшого аналізу. За допомогою графіків можна оцінити час перехідного процесу, наявність перерегулювання, коливання, статичну похибку та стабільність роботи системи. Це дає змогу порівнювати різні налаштування регулятора та обирати параметри, які забезпечують найбільш якісне відпрацювання заданої траєкторії.

Для реалізації логіки керування, наближеної до реальної роботи промислового обладнання, використовується середовище CODESYS 2.3 (<https://www.codesys.com/>). Це програмне середовище призначене для розроблення програм керування для програмованих логічних контролерів і підтримує мови стандарту IEC 61131-3, зокрема Structured Text. У межах роботи CODESYS 2.3 використовується для створення алгоритму керування маніпуляційним роботом у вигляді покрокового автомата, де кожен стан відповідає окремому етапу роботи: початковому положенню, запуску циклу, переміщенню, захопленню деталі, перенесенню, встановленню деталі та аварійній зупинці.

У роботі використовується два програмні середовища. MATLAB/Simulink застосовується для побудови імітаційної моделі електромеханічного приводу, аналізу перехідних процесів і дослідження параметрів системи керування. CODESYS 2.3 використовується для реалізації програмної логіки керування, яка може бути застосована в системах автоматизації на базі ПЛК. Поєднання цих середовищ дозволяє спочатку перевірити роботу системи на імітаційній моделі, а потім описати алгоритм керування у вигляді програми для реальної системи.

3.2 Створення моделі електромеханічного приводу

Для дослідження роботи системи керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15 було створено імітаційну модель у програмному середовищі MATLAB/Simulink. Метою побудови моделі є перевірка працездатності системи керування, аналіз перехідних процесів, оцінка точності позиціонування та дослідження впливу параметрів приводу на якість руху ланки маніпулятора [34, 35].

Імітаційна модель побудована для однієї осі робота, оскільки кожна з шести осей маніпулятора має подібну структуру електромеханічного приводу. До складу моделі входять задавальний блок, суматор, PID-регулятор, силовий перетворювач, електродвигун, редуктор, ланка маніпулятора, датчики зворотного зв'язку та блок відображення результатів.

На вхід системи подається задане положення ланки, яке порівнюється з фактичним положенням, отриманим від енкодера. У результаті формується похибка керування, яка надходить на PID-регулятор. Регулятор обробляє цю похибку та формує керуючий сигнал для силового перетворювача. Силовий перетворювач у моделі виконує роль серводрайвера, що забезпечує керування електродвигуном.

У моделі також враховано редуктор, механічну частину приводу та систему зворотного зв'язку за положенням, швидкістю і струмом. Для моделювання були використані розраховані параметри електромеханічного приводу: момент навантаження $M_n = 73,05 \text{ Н} \cdot \text{м}$, номінальна кутова швидкість двигуна $\omega_{\text{дв}} = 314 \text{ рад/с}$, номінальний момент двигуна $M_{\text{дв}} = 2,39 \text{ Н} \cdot \text{м}$, номінальний струм двигуна $I_n = 2,46 \text{ А}$, коефіцієнт моменту $K_t = 0,97 \text{ Н} \cdot \text{м/А}$, коефіцієнт перетворення керуючого сигналу у момент $K_m = 2,39 \text{ Н} \cdot \text{м}$, обране передаточне число редуктора $i_g = 100$, момент на виході редуктора $M_{\text{вих}} = 215,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$, приведений момент інерції $J_{\text{пр}} = 0,001366 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, коефіцієнт в'язкого тертя $B = 0,000761 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$, електромеханічна стала часу $T_m = 1,80 \text{ с}$ та коефіцієнт підсилення об'єкта керування $K_{\text{об}} = 31,41$. На основі цих параметрів передатна функція об'єкта керування має вигляд $W_{\text{об}}(s) = 31,41 / [s(1,80s + 1)]$. Значення параметрів використовуються для побудови імітаційної моделі електромеханічного приводу та подальшої перевірки роботи системи керування.

У середовищі Simulink модель реалізована у вигляді блок-схеми. Блок Step використовується для подання заданого положення, блок Sum формує похибку керування, блок PID Controller виконує регулювання, а блоки Transfer Function описують електричну та механічну частини приводу. Для спостереження результатів використовуються блоки Scope, які дозволяють отримати графіки зміни положення, швидкості, струму та похибки у часі.

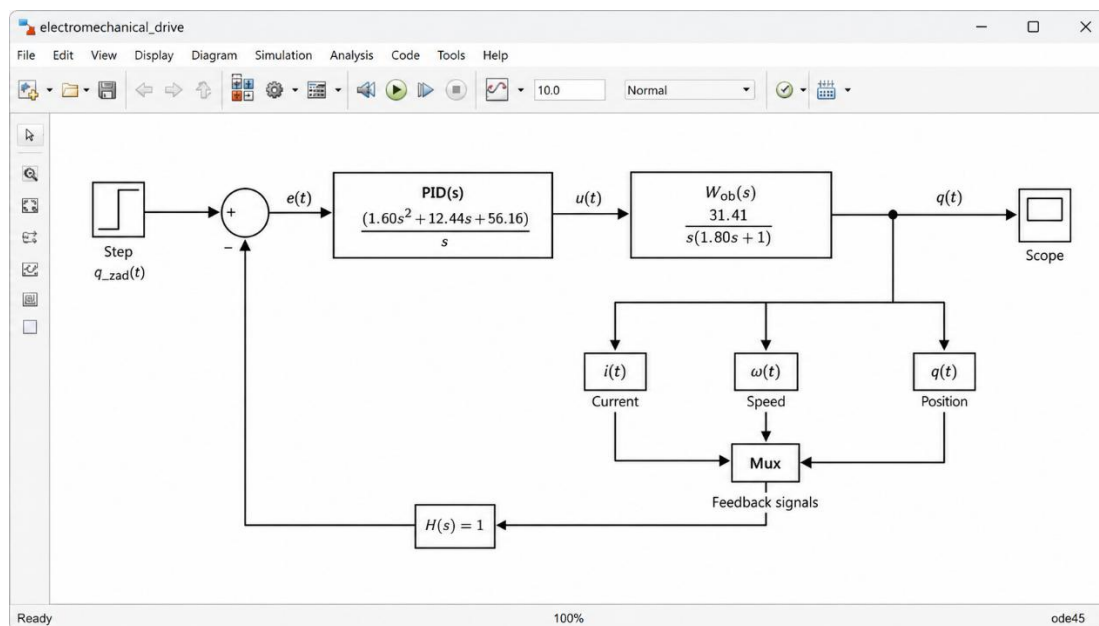


Рис. 3.1 Імітаційна модель електромеханічного приводу в програмному середовищі MATLAB/Simulink

Окрім імітаційної моделі в MATLAB/Simulink, у роботі було розглянуто програмну реалізацію логіки керування в середовищі CODESYS 2.3. Це середовище використовується для розроблення програм для програмованих логічних контролерів і підтримує мови стандарту IEC 61131-3, зокрема Structured Text. На відміну від MATLAB/Simulink, який застосовується для дослідження та моделювання динаміки приводу, CODESYS 2.3 дає змогу описати алгоритм керування у вигляді програми, наближеної до реальної роботи промислового обладнання.

Алгоритм у CODESYS 2.3 реалізовано у вигляді покрокового автомата з використанням оператора CASE step OF. Кожне значення змінної step відповідає окремому стану роботи маніпулятора: початковому стану системи, очікуванню запуску, початку автоматичного циклу, переміщенню до робочої позиції, захопленню деталі, перенесенню, встановленню деталі та поверненню у вихідне положення.

Такий підхід дозволяє чітко розділити процес керування на окремі етапи та спростити контроль виконання технологічного циклу.

У програмі використовуються дискретні вихідні сигнали Y1–Y14, які відповідають за керування виконавчими механізмами маніпулятора: підніманням і опусканням ланок, поворотом, висуванням, втягуванням та роботою захоплювача.

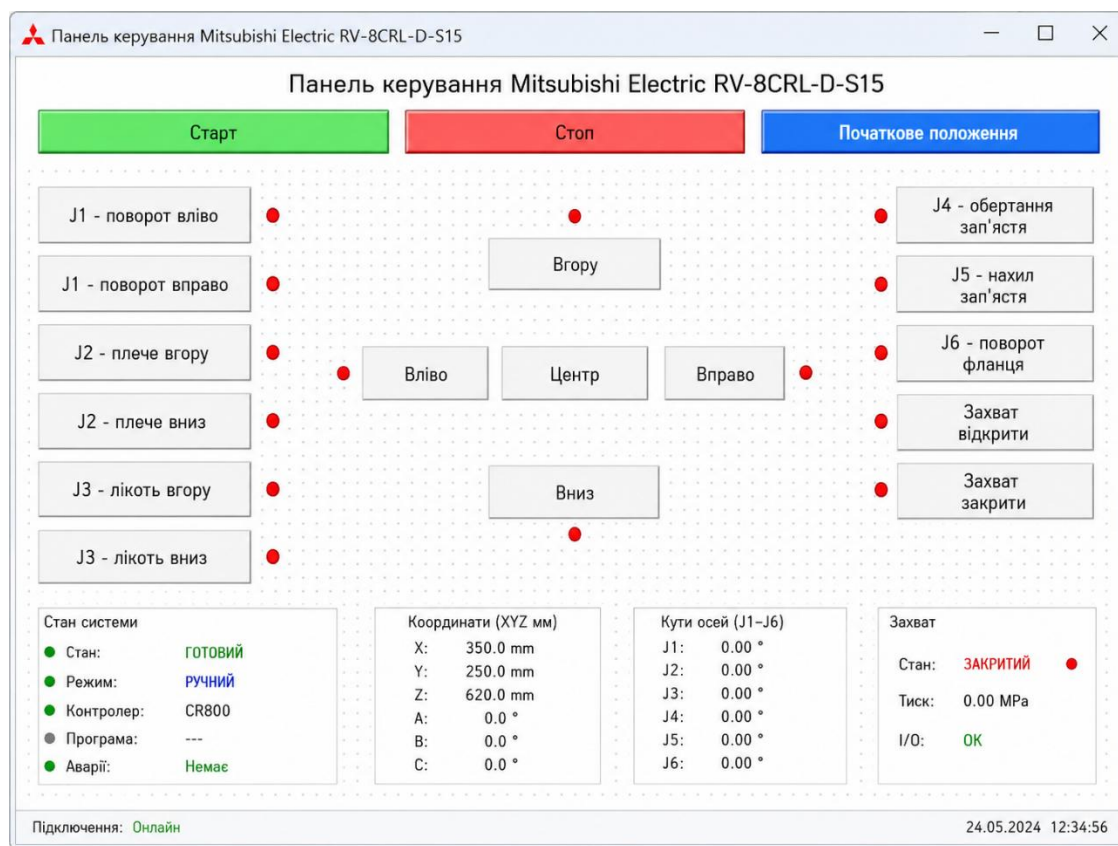


Рис.3.2 Панель керування Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15

Вхідні сигнали x1–x8, base, start, stop та інші використовуються для контролю кінцевих положень, запуску, зупинки та переходу між етапами циклу. Окремо передбачено аварійний стан $step = 100$, у якому всі виконавчі механізми вимикаються, а система переходить у безпечний режим.

Таблиця 3.1 Перелік використаних змінних, їх тип даних та значення

№	Назва змінної	Тип	Значення / призначення
1	Y1	bool	Підйом рук / рух осі у напрямку піднімання
2	Y2	bool	Опускання рук / повернення осі у протилежному напрямку

№	Назва змінної	Тип	Значення / призначення
3	Y3	bool	Поворот рук вліво
4	Y4	bool	Поворот рук вправо
5	Y5	bool	Витягування лівої руки / опускання захоплювача з боку верстата №1
6	Y6	bool	Витягування правої руки / опускання захоплювача з боку верстата №2
7	Y7	bool	Втягування лівої руки / піднімання після захоплення
8	Y8	bool	Втягування правої руки / піднімання після встановлення деталі
9	Y9	bool	Поворот лівого захвату у робоче положення
10	Y10	bool	Поворот правого захвату у робоче положення
11	Y11	bool	Повернення лівого захвату у початкове положення
12	Y12	bool	Повернення правого захвату у початкове положення
13	Y13	bool	Затиск лівого захвату
14	Y14	bool	Затиск правого захвату
15	X1 / x1	bool	Кінцеве положення повернення основи у початкову позицію
16	X2 / x2	bool	Кінцеве положення переміщення основи до верстата №1
17	X3 / x3	bool	Кінцеве положення повороту або висування вліво
18	X4 / x4	bool	Кінцеве положення повороту або переміщення до верстата №2
19	X5 / x5	bool	Кінцеве положення лівої руки у зоні захоплення
20	X6 / x6	bool	Кінцеве положення правої руки у зоні встановлення деталі
21	X7 / x7	bool	Кінцеве положення втягування лівої руки
22	X8 / x8	bool	Кінцеве положення втягування правої руки
23	J1	bool	Ручна команда на рух Y1
24	J2	bool	Ручна команда на рух Y2
25	J3	bool	Ручна команда на рух Y3
26	J4	bool	Ручна команда на рух Y4
27	J5	bool	Ручна команда на рух Y5
28	J6	bool	Ручна команда на рух Y6
29	J7	bool	Ручна команда на рух Y7
30	J8	bool	Ручна команда на рух Y8
31	J9	bool	Ручна команда на рух Y9
32	J10	bool	Ручна команда на рух Y10

№	Назва змінної	Тип	Значення / призначення
33	J11	bool	Ручна команда на рух Y11
34	J12	bool	Ручна команда на рух Y12
35	J13	bool	Ручна команда на затиск лівого захвату Y13
36	J14	bool	Ручна команда на затиск правого захвату Y14
37	J16	bool	Ручна команда на розтискання лівого захвату
38	J17	bool	Ручна команда на розтискання правого захвату
39	start	bool	Команда запуску автоматичного циклу
40	stop	bool	Команда зупинки або переходу в аварійний стан
41	base	bool	Ознака перебування маніпулятора у базовому положенні
42	step	int	Номер поточного кроку покрокового алгоритму CASE
43	tm	TON	Таймер витримки перед початком автоматичного циклу
44	tm.Q	bool	Вихід таймера; TRUE після завершення заданої витримки часу
45	O1	bool	Дозвіл або ознака готовності роботи з верстатом №1
46	O2	bool	Дозвіл або ознака готовності роботи з верстатом №2
47	V1	bool	Прапорець завершення операції з верстатом №1
48	V2	bool	Прапорець завершення операції з верстатом №2
49	V3	bool	Сигнал стану або зайнятості верстата №1
50	V4	bool	Сигнал стану або зайнятості верстата №2
51	K	bool	Ознака завершення робочого циклу
52	T#2s	time	Часова витримка 2 секунди перед початком циклу

Реалізація алгоритму в CODESYS 2.3 дозволяє показати не лише математичну та імітаційну частину роботи, а й практичний підхід до програмування керування промисловим маніпулятором. MATLAB/Simulink використовується для перевірки динаміки електромеханічного приводу, а CODESYS 2.3 — для опису логіки роботи системи керування, яка може бути реалізована на програмованому логічному контролері.

3.3 Налаштування параметрів моделі системи керування

Налаштування параметрів моделі системи керування є важливим етапом дослідження електромеханічного приводу промислового маніпуляційного робота Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15[36]. У межах роботи розглянуто два підходи: налаштування імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink та налаштування програмної логіки керування в середовищі CODESYS 2.3. Перший підхід використовується для аналізу динаміки приводу та перехідних процесів, а другий — для опису послідовності роботи маніпулятора у вигляді алгоритму керування.

В імітаційній моделі MATLAB/Simulink основну увагу приділено параметрам електромеханічного приводу та регулятора. Модель будується для однієї осі маніпулятора, оскільки всі шість осей мають подібну структуру керування: задавальний сигнал, регулятор, силовий перетворювач, електродвигун, редуктор, механічна ланка та зворотний зв'язок. Такий підхід дозволяє дослідити основні процеси, які виникають під час руху ланки, без ускладнення моделі всіма осями одночасно.

Для налаштування електричної частини приводу враховуються параметри серводвигуна змінного струму та серводрайвера, які визначають формування електромагнітного моменту і реакцію приводу на керуючий сигнал. Оскільки у роботі використовується серводвигун змінного струму, керування здійснюється через моментну складову струму статора, що формується силовим перетворювачем. За результатами розрахунку номінальна кутова швидкість двигуна становить $\omega_{\text{дв}} = 314$ рад/с, номінальний момент двигуна $M_{\text{дв}} = 2,39$ Н·м, номінальний струм двигуна $I_{\text{н}} = 2,46$ А, а коефіцієнт моменту дорівнює $K_t = 0,97$ Н·м/А. Також визначено коефіцієнт перетворення керуючого сигналу у момент $K_m = 2,39$ Н·м. Ці параметри використовуються для опису формування електромагнітного моменту серводвигуна та подальшої побудови імітаційної моделі електромеханічного приводу. [37]

Для механічної частини електромеханічного приводу задаються розраховані параметри інерції, тертя та редуктора. За результатами розрахунку момент навантаження становить $M_{\text{н}} = 73,05$ Н·м, обране передаточне число редуктора $i_g =$

100, а момент на виході редуктора дорівнює $M_{\text{вих}} = 215,1 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Це підтверджує, що обране передаточне число забезпечує необхідне збільшення крутного моменту на виході приводу та дає запас для переміщення ланки маніпулятора.

Приведений момент інерції системи становить $J_{\text{пр}} = 0,001366 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, а коефіцієнт в'язкого тертя — $B = 0,000761 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с/рад}$. Момент інерції визначає здатність системи чинити опір зміні швидкості, тобто впливає на процеси розгону та гальмування ланки маніпулятора. Коефіцієнт в'язкого тертя характеризує механічні втрати у приводі, а редуктор забезпечує зменшення швидкості обертання та збільшення крутного моменту на вихідній ланці. На основі цих параметрів також було визначено електромеханічну сталу часу $T_m = 1,80 \text{ с}$ та коефіцієнт підсилення об'єкта керування $K_{\text{об}} = 31,41$.

Окремо налаштовуються параметри PID-регулятора. У роботі коефіцієнти регулятора не приймаються довільно, а визначаються розрахунковим методом на основі заданих вимог до якості перехідного процесу. Для системи керування положенням прийнято такі вимоги: перерегулювання не більше 10 %, час регулювання не більше 0,8 с та статична похибка, що прямує до нуля.

На основі методу розміщення полюсів було отримано такі значення коефіцієнтів PID-регулятора: $K_p = 12,44$, $K_i = 56,16$, $K_d = 1,60$. Пропорційна складова впливає на швидкість реакції системи на поточну похибку, інтегральна складова забезпечує усунення статичної похибки, а диференціальна складова покращує демпфування, зменшує коливання та перерегулювання.

Отримані параметри використовуються для побудови імітаційної моделі системи керування електромеханічним приводом. Під час моделювання перевіряється правильність виконаних розрахунків за графіками положення, швидкості, струму та похибки керування.

У середовищі Simulink для перевірки роботи системи задається вхідний сигнал, наприклад ступінчаста зміна положення. Такий сигнал дозволяє оцінити реакцію приводу на команду переміщення. У результаті моделювання аналізуються час перехідного процесу, величина перерегулювання, плавність зміни швидкості,

максимальний струм двигуна та похибка керування. Отримані графіки дозволяють оцінити, наскільки коректно підібрані параметри системи керування.

Другий випадок стосується реалізації логіки керування в середовищі CODESYS 2.3. На відміну від MATLAB/Simulink, де досліджується динамічна поведінка приводу, CODESYS 2.3 використовується для опису алгоритму роботи маніпулятора у вигляді програми для програмованого логічного контролера. У цьому випадку налаштовуються не параметри передатних функцій, а логічні змінні, стани, входи, виходи, таймери та умови переходу між етапами циклу.

Алгоритм керування в CODESYS 2.3 реалізовано за допомогою оператора CASE step OF. Змінна step визначає поточний етап роботи системи. Наприклад, step = 0 відповідає початковому стану, step = 1 — очікуванню запуску, step = 2 — початку автоматичного циклу, step = 3 — переміщенню до верстата №1, step = 4 — підйому деталі, step = 5 — переміщенню до верстата №2, step = 6 — встановленню деталі, step = 7 — поверненню у вихідне положення, а step = 100 — аварійній зупинці.

Основними вихідними змінними програми є Y1–Y14. Вони відповідають за керування виконавчими механізмами маніпулятора: переміщенням ланок, поворотом, висуванням, втягуванням і роботою захоплювача. Для кожного стану задається певна комбінація вихідних сигналів. Наприклад, у початковому положенні частина виходів встановлюється у TRUE, щоб утримувати маніпулятор у базовому стані, а інші виходи залишаються FALSE. Під час переходу до наступного етапу програма змінює стани відповідних виходів.

Вхідні змінні x1–x8 використовуються для контролю кінцевих положень механізмів. Вони показують, чи досягла ланка або захоплювач потрібного положення. Наприклад, якщо активується певний кінцевий датчик, програма переходить до наступної дії або змінює напрям руху виконавчого механізму.

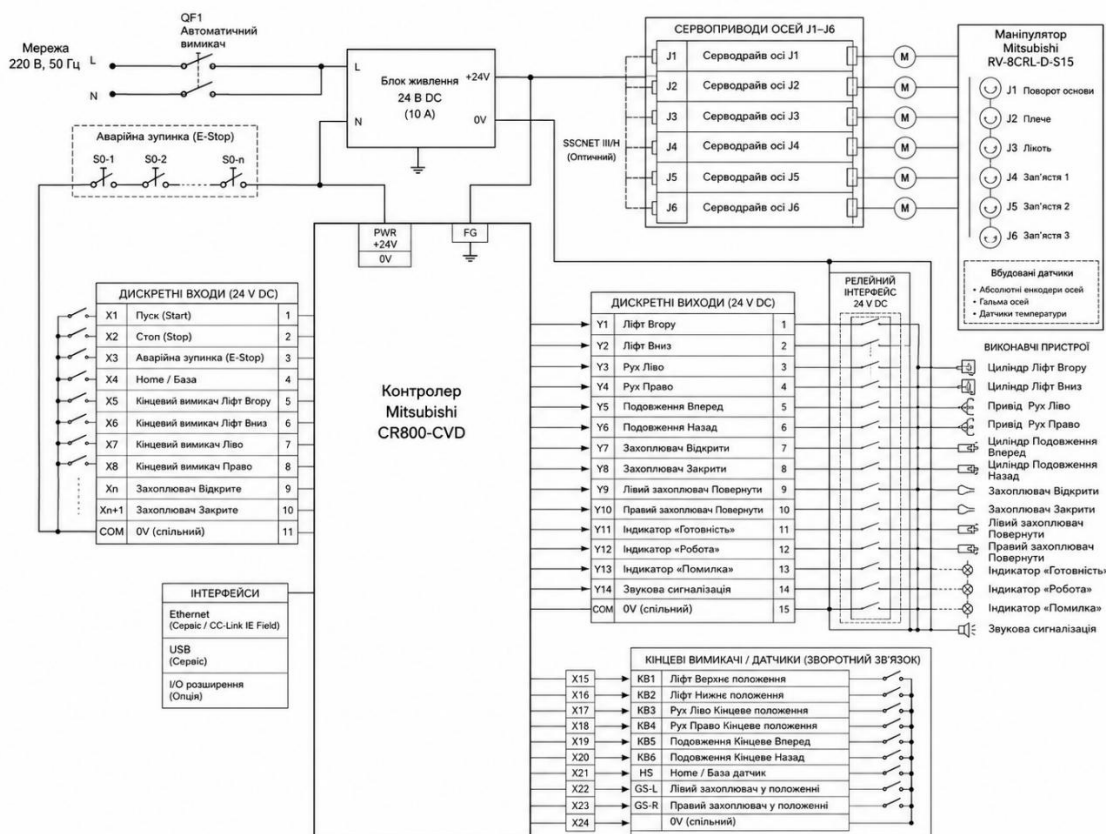


Рис.3.3 Електрична схема підключення Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15

Змінні start і stop відповідають за запуск та зупинку циклу, а змінна base використовується для перевірки, чи знаходиться маніпулятор у початковому положенні.

Окремо в програмі використовується таймер tm, який задає витримку часу перед переходом до автоматичного циклу. Наприклад, у стані step = 2 таймер запускається на 2 секунди, після чого активуються допоміжні сигнали O1 та O2 і відбувається перехід до наступного етапу. Використання таймера дозволяє уникнути миттєвого переходу між діями та забезпечити більш стабільну роботу алгоритму.

Для підвищення безпеки в програмі передбачено аварійний стан step = 100. У цьому стані всі вихідні сигнали Y1–Y14, а також допоміжні сигнали V1, V2 і K вимикаються. Це дозволяє зупинити всі виконавчі механізми у разі натискання кнопки stop або виникнення аварійної ситуації. Після скидання сигналів start і stop система може повернутися до початкового стану step = 0.

Налаштування програми в CODESYS 2.3 полягає у правильному призначенні змінних, визначенні їх типів, встановленні початкових станів, перевірці умов

переходу між кроками та узгодженні сигналів із відповідними елементами панелі керування. Для зручності роботи оператора можуть бути реалізовані кнопки «Старт», «Стоп», «Початкове положення», ручне керування осями J1–J6, а також індикація стану системи, положення маніпулятора та роботи захоплювача.

3.4 Проведення симуляції електромеханічного приводу

Симуляція електромеханічного приводу промислового маніпуляційного робота Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15 проводилась у середовищі MATLAB/Simulink. Метою симуляції було перевірити роботу розробленої системи керування, оцінити характер перехідного процесу та визначити, наскільки точно привод відпрацьовує задане положення.[38]

На вхід моделі подавалося задане положення ланки у вигляді ступінчастого сигналу. Після цього сигнал порівнювався з фактичним положенням, яке надходило через зворотний зв'язок від енкодера. Отримана похибка подавалася на PID-регулятор, який формував керуючий сигнал для електромеханічного приводу. У моделі враховувалися електрична частина двигуна, механічна частина, редуктор, ланка маніпулятора та датчики зворотного зв'язку.

Під час симуляції аналізувалися графіки зміни положення ланки, кутової швидкості, струму двигуна та похибки керування. За графіком положення оцінювалася точність виходу системи на задане значення, за графіком швидкості — плавність руху, за графіком струму — навантаження на двигун, а за графіком похибки — якість роботи системи керування.

Отримані результати показують, що після подачі керуючого сигналу привод переходить у нове положення, а похибка керування поступово зменшується.

Наявність невеликого перерегулювання на початку руху пояснюється інерційністю електромеханічної системи. Після завершення перехідного процесу система стабілізується, а фактичне положення ланки наближається до заданого значення.

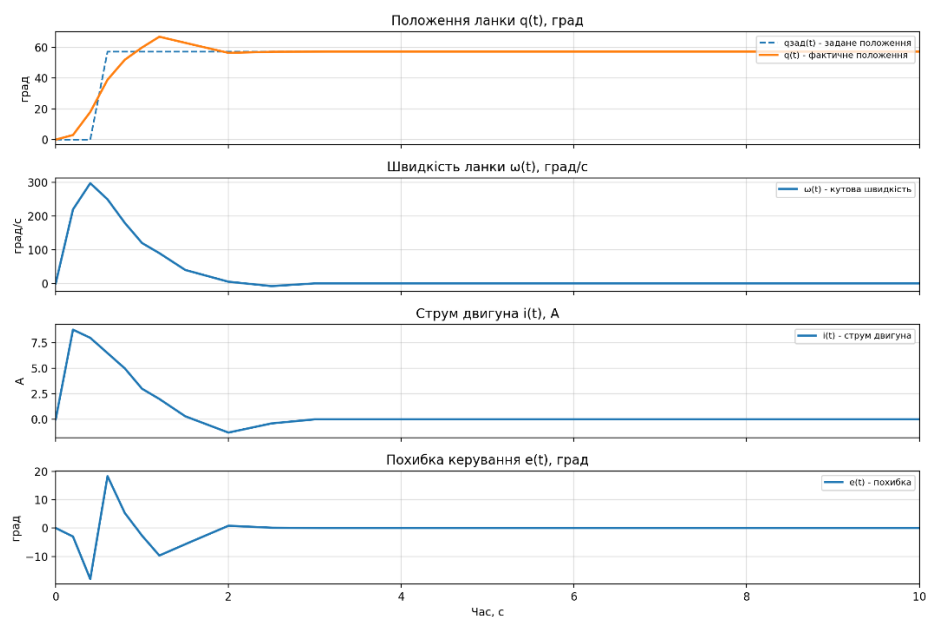


Рис.3.4 Результати симуляції роботи електромеханічного приводу

Таблиця 3.2 — Значення перехідних процесів системи керування електромеханічним приводом

Час, с	Задане положення $q_{\text{зад}}$, град	Фактичне положення $q(t)$, град	Кутова швидкість $\omega(t)$, град/с	Струм двигуна $i(t)$, А	Похибка $e(t)$, град
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.2	0.0	3.0	220.0	8.8	-3.0
0.4	0.0	18.0	298.0	8.0	-18.0
0.6	57.3	39.0	250.0	6.5	18.3
0.8	57.3	52.0	180.0	5.0	5.3
1.0	57.3	60.0	120.0	3.0	-2.7
1.2	57.3	67.0	90.0	2.0	-9.7
1.5	57.3	63.0	40.0	0.3	-5.7
2.0	57.3	56.5	5.0	-1.3	0.8
2.5	57.3	57.2	-8.0	-0.4	0.1
3.0	57.3	57.3	0.0	0.0	0.0
4.0	57.3	57.3	0.0	0.0	0.0
5.0	57.3	57.3	0.0	0.0	0.0

Таблиця 3.3 — Основні показники якості системи керування

Показник	Значення
Задане положення $q_{зад}$	$57,3^\circ$
Максимальне положення q_{max}	$67,0^\circ$
Максимальна кутова швидкість ω_{max}	$298,0$ град/с
Максимальний струм двигуна i_{max}	$8,8$ А
Перерегулювання σ	$\approx 16,9 \%$
Час регулювання t_p	$\approx 2,5-3,0$ с
Статична похибка $\epsilon_{ст}$	$\approx 0^\circ$

3.5 Аналіз результатів моделювання

За результатами проведеної симуляції електромеханічного приводу промислового маніпуляційного робота було отримано графіки зміни положення ланки, кутової швидкості, струму двигуна та похибки керування у часі. Ці залежності дозволяють оцінити якість роботи системи керування та характер перехідного процесу.[39]

Графік положення ланки показує, що після подачі заданого сигналу фактичне положення поступово наближається до заданого значення. На початку руху спостерігається невелике перерегулювання, що пояснюється інерційністю електромеханічного приводу та дією регулятора. Після завершення перехідного процесу положення стабілізується, а статична похибка практично зникає.

Графік кутової швидкості демонструє, що на початку руху швидкість різко зростає, після чого поступово зменшується до нуля. Це свідчить про те, що привод виконує розгін ланки, а потім гальмування перед виходом у задане положення. Відсутність тривалих коливань швидкості вказує на достатню стійкість системи керування.

На графіку струму двигуна видно, що найбільше значення струму виникає на початку руху, коли приводу необхідно подолати інерцію механічної системи та створити необхідний електромагнітний момент. Надалі струм зменшується і

наближається до сталого значення, що свідчить про зменшення навантаження після завершення переміщення.

Графік похибки керування показує, що на початку перехідного процесу похибка має найбільше значення, оскільки фактичне положення ще не відповідає заданому. У процесі роботи регулятора похибка поступово зменшується та після стабілізації системи наближається до нуля. Це підтверджує коректну роботу замкненої системи керування зі зворотним зв'язком.[40]

Отримані результати моделювання свідчать про те, що розроблена система керування забезпечує відпрацювання заданого положення ланки маніпулятора, плавне зменшення похибки та стабілізацію приводу після завершення перехідного процесу. Наявне незначне перерегулювання може бути зменшене шляхом додаткового налаштування коефіцієнтів PID-регулятора.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було виконано створення та дослідження імітаційної моделі електромеханічного приводу промислового маніпуляційного робота Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15. Для моделювання було використано середовище MATLAB/Simulink, яке дозволило подати систему керування у вигляді блок-схеми та дослідити перехідні процеси без використання реального обладнання.

У процесі моделювання було враховано основні елементи електромеханічного приводу: задавальний сигнал, PID-регулятор, силовий перетворювач, електродвигун, редуктор, ланку маніпулятора та систему зворотного зв'язку. Для аналізу роботи системи були задані параметри електричної та механічної частин приводу, а також початкові коефіцієнти регулятора.

Також було розглянуто реалізацію логіки керування в середовищі CODESYS 2.3. Алгоритм роботи маніпулятора подано у вигляді покрокового автомата, де кожен стан відповідає окремому етапу технологічного циклу: початковому стану, очікуванню запуску, переміщенню, захопленню деталі, перенесенню, встановленню деталі, поверненню у вихідне положення та аварійній зупинці.

За результатами симуляції отримано графіки зміни положення ланки, кутової швидкості, струму двигуна та похибки керування. Аналіз графіків показав, що система відпрацьовує задане положення, похибка керування поступово зменшується, а після завершення перехідного процесу привод переходить у сталий режим. Невелике перерегулювання на початку руху пояснюється інерційністю електромеханічної системи та може бути зменшене шляхом додаткового налаштування PID-регулятора.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було розроблено систему керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15. Запропоноване рішення базується на використанні замкненої системи керування зі зворотним зв'язком, що дозволяє забезпечити контроль положення, швидкості та струму приводу, а також підвищити точність і стабільність руху ланок маніпулятора.

У першому розділі було виконано аналіз промислових роботів та їх приводів, розглянуто класифікацію приводів, особливості електромеханічних систем, а також основні методи керування приводами маніпуляційних роботів. У результаті встановлено, що для сучасних промислових маніпуляторів найбільш доцільним є використання електромеханічних приводів із серводвигунами, редукторами та датчиками зворотного зв'язку, оскільки вони забезпечують високу точність позиціонування, швидкодію та можливість реалізації складних траєкторій руху.

У другому розділі було розглянуто технічні характеристики робота Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15, сформульовано задачу керування електромеханічним приводом та розроблено структурну і функціональну схеми системи керування. Було визначено основні елементи приводу, зокрема серводвигун, серводрайвер, редуктор, енкодер, датчики швидкості й струму, а також контролер. Також було наведено математичний опис електромеханічного приводу, який враховує електричну частину двигуна, формування електромагнітного моменту, механічну частину, вплив редуктора та зворотний зв'язок.

У третьому розділі було створено імітаційну модель електромеханічного приводу в середовищі MATLAB/Simulink. Модель дозволила дослідити перехідні процеси, зміну положення ланки, кутової швидкості, струму двигуна та похибки керування. За результатами моделювання встановлено, що система відпрацьовує задане положення, а похибка після завершення перехідного процесу зменшується до мінімального значення. Наявне незначне перерегулювання пояснюється інерційністю електромеханічної системи та може бути зменшене шляхом додаткового налаштування параметрів PID-регулятора.

Окрім імітаційного моделювання, у роботі було розглянуто програмну реалізацію логіки керування в середовищі CODESYS 2.3. Алгоритм керування було подано у вигляді покрокового автомата, де кожен стан відповідає окремому етапу роботи маніпулятора: початковому положенню, очікуванню запуску, переміщенню, захопленню деталі, перенесенню, встановленню деталі, поверненню у вихідне положення та аварійній зупинці. Такий підхід дозволяє структуровано описати послідовність роботи системи керування та наблизити її до реальної логіки функціонування промислового обладнання.

Результати підтверджують працездатність розробленої системи керування електромеханічним приводом промислового маніпуляційного робота. Поставлену мету роботи досягнуто, оскільки було виконано аналіз існуючих рішень, розроблено структуру системи керування, побудовано математичний опис приводу, створено імітаційну модель та реалізовано алгоритм керування в програмному середовищі. Запропоноване рішення може бути використане як основа для подальшого вдосконалення систем керування промисловими маніпуляторами та їх практичної реалізації в автоматизованих виробничих процесах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ніколайчук В. М. Основи робототехніки. С. 14–20. Режим доступу – <https://kemt.kiev.ua/assets/library/files/pos%D1%96bnik-osnovi-robototexn%D1%96ki-dlya-vs%D1%96x.pdf>
2. Пересада С. М., Ніконенко Є. О., Зінченко О. Ю. Робототехніка та мехатроніка. Розрахунково-графічна робота [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 115 с. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41011>
3. Стаценко О. В. Робототехніка та мехатроніка. Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 57 с. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/items/1523c3d7-2b1d-48b3-b4c3-b2e6a08c5220>
4. Лісовець С. М. Робототехніка [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/bitstreams/4a857e75-bd7c-4145-bf3c-7bb13b9d18db/download>
5. Трет'як А. В. Основи робототехніки [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. Режим доступу – <https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/17597/1/%D0%9E%D0%A1%D0%9D%D0%9E%D0%92%D0%98%20%D0%A0%D0%9E%D0%91%D0%9E%D0%A2%D0%9E%D0%A2%D0%95%D0%A5%D0%9D%D0%86%D0%9A%D0%98%20.pdf>
6. Аніщенко М. В. Промислові роботи [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Харків: НТУ «ХПІ», 2025. Режим доступу – <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/3cc1847c-5a8c-47db-90d9-9bebe85c303f>
7. Шульга А. В. Мехатроніка. Курс лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/items/2aedd92e-056a-4f1b-9c13-450efd2026fc>

8. Губарев О. П. Функціональні модулі систем мехатроніки з мікропроцесорним керуванням [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/items/6980a2b7-68c4-4a34-9461-4eaf3760fa20>

9. Закладний О. М., Прокопенко В. В., Закладний О. О. Електропривод [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2008. 316 с. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/56294/1/Elektropryvod.pdf>

10. Основи промислового електроприводу [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. Режим доступу – https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48906/1/Osnovy_promyslovoho_elektropryvodu.pdf

11. Автоматизований електропривод [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. Режим доступу – https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48821/1/Avtomatyzovanyi_elektropryvod.pdf

12. Красношاپка Н. Д. Автоматизований електропривод. Розділ 1. Теорія електропривода [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/items/0d4ea828-349e-4aa0-9050-ca2b21c29ff9>

13. Мугенов Д. Д. Електропривод. Курс лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/bitstreams/b940d1a3-2482-41ce-91cf-237679ec0084/download>

14. Торопов А. В. Електропривод [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/bitstreams/85457a1b-8c01-4893-9e9e-376c2d34a3c5/download>

15. Пижов В. М. Електропривод [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. Режим доступу –

<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/0f4e0e1e-820f-47b9-8733-bc06561b0825/content>

16. Бур'ян С. О. Електропривод. Розрахунково-графічна робота [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/bitstreams/b91a2f43-ef02-4a45-ab6d-a1bc6e2b1fb5/download>

17. Приймак Б. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/items/beb21beb-f848-4720-b891-af52ada954bf>

18. Бунь В. П., Баган Т. Г. Теорія автоматичного керування [Електронний ресурс]: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/items/bada5317-5234-4aee-91bc-ea769342bba3>

19. Толочко О. І., Пересада С. М., Приймак Б. І. Теорія автоматичного керування. Курсова робота [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 163 с. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/items/87bbeeb6-0ffe-4d34-8b6b-7923fc676167>

20. Босак А. В., Торопов А. В., Дубовик В. Г. Цифрові та нелінійні системи керування [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. Режим доступу – https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48654/1/Tsyfrovi_systemy_keruvannia.pdf

21. Гайденко Ю. А. Електричні машини. Курс лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 211 с. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/items/be03f37f-32d5-4855-9054-10b880915aa0>

22. Гайденко Ю. А., Цивінський С. С. Електричні машини. Лабораторні роботи [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/items/0ed3ad4b-807b-4ffb-a5ce-561c76c5d5a4>

23. Чумак В. В., Коваленко М. А., Котлярова В. В. Безконтактні регульовані електричні машини. Практикум [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 55 с. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/items/88dc746e-7902-4bf4-8b96-03561eeb38e9>

24. Чумак В. В. Трифазний асинхронний двигун загального призначення з короткозамкненим ротором: курсовий проєкт [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/bitstreams/bf77f173-18df-4a53-8bf5-868a6368fcab/download>

25. Електротехніка: електричні та магнітні кола. Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 180 с. Режим доступу – <https://ela.kpi.ua/items/cbda403a-5d82-4ea1-a2ad-5345262fa881>

26. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепиков В. Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навчальний посібник. Київ: Либідь, 2005. 680 с.

27. Попович М. Г., Кострицький В. В. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод: теорія і практика: навчальний посібник. Київ: КНУТД, 2008. 408 с.

28. Булгар В. В. Теорія електроприводу: збірник задач: навчальний посібник. Одеса: Поліграф, 2006. 408 с.

29. Зеленов А. Б. Теорія електропривода: методика проєктування електроприводів: підручник. Луганськ: Ноулідж, 2010. 670 с.

30. Піцан Р., Бардачевський В., Бойчук Б. Збірник задач до курсу «Електропривод»: навчальний посібник. Львів: Видавництво державного університету «Львівська політехніка», 1999. 426 с.

31. Ловеїкін В. С., Ромасевич Ю. О., Човнюк Ю. В. Мехатроніка: навчальний посібник. Київ: ЦП «Компринт», 2012. 358 с

32. Пелевін Л. Є., Почка К. І., Гаркавенко О. М., Міщук Д. О., Русан І. В. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні: підручник. Київ: НВП «Інтерсервіс», 2016. 258 с.

33. Цвіркун Л. І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка: навчальний посібник. 3-тє вид., перероб. і доп. Дніпро: НГУ, 2017. 224 с.

34. Пелевін Л. Є., Міщук Д. О., Рашківський В. П., Горбатюк Є. В., Аржаєв Г. О., Красніков В. Ф. Гідравліка, гідромашини та гідропневмоавтоматика. Київ: КНУБА, 2015. 340 с.

35. Mitsubishi Electric. RV-8CRL-D-S15 Industrial Robot. Technical specifications [Electronic resource]. Режим доступу – <https://emea-fa.mitsubishielectric.com/fa/products/rbt/robot/vertical/RV-CR-series/rv-8crl-d-s15.html>

36. Mitsubishi Electric. CR800 Robot Controller. Technical documentation [Electronic resource]. Режим доступу – <https://emea-fa.mitsubishielectric.com/fa/products/rbt/robot/cnt/cr800>

37. ABB Robotics. IRB 1200 Product Specification [Electronic resource]. Режим доступу – <https://new.abb.com/products/robotics/robots/articulated-robots/irb-1200>

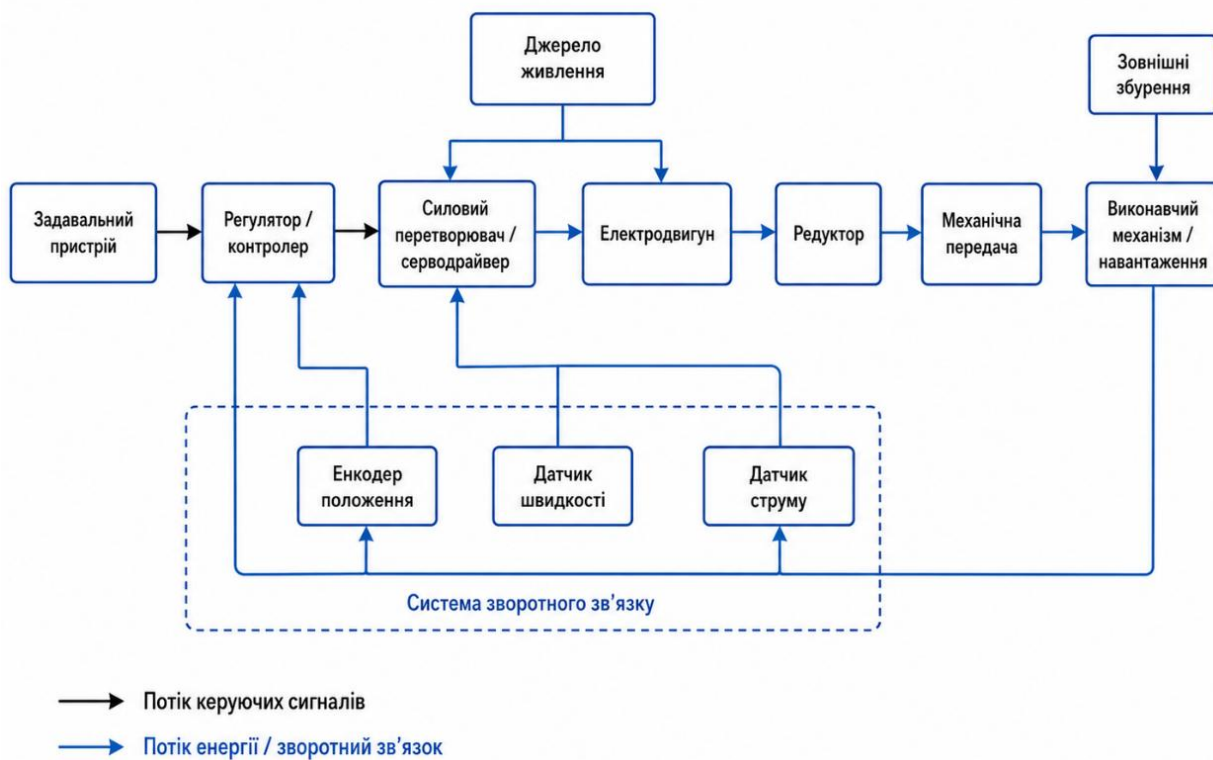
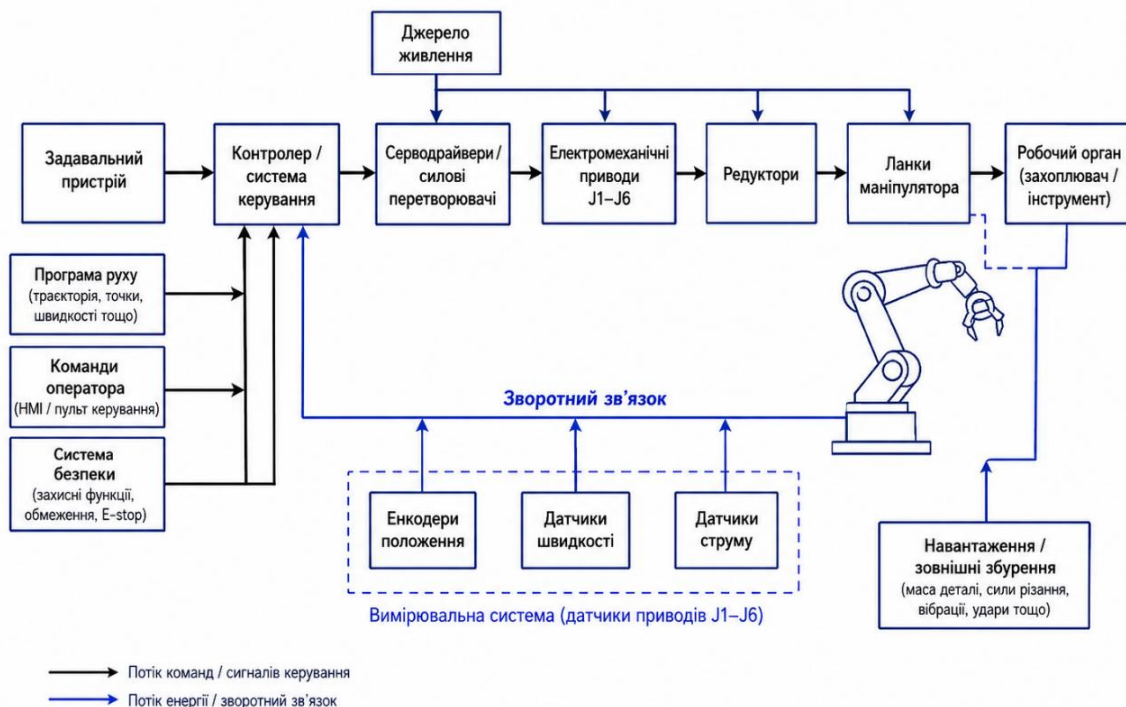
38. FANUC. LR Mate 200iD Robot. Technical specifications [Electronic resource]. Режим доступу – <https://www.fanucamerica.com/products/robots/series/lr-mate/lr-mate-200i>

39. Universal Robots. UR10e Technical Specifications [Electronic resource]. Режим доступу – <https://www.universal-robots.com/products/ur10-robot/>

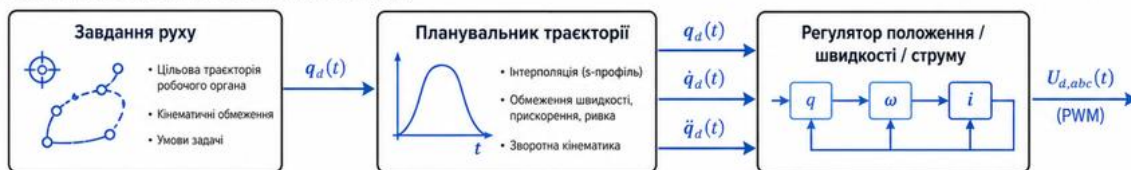
40. ISO 8373:2021. Robotics — Vocabulary. International Organization for Standardization, 2021.

Додаток А

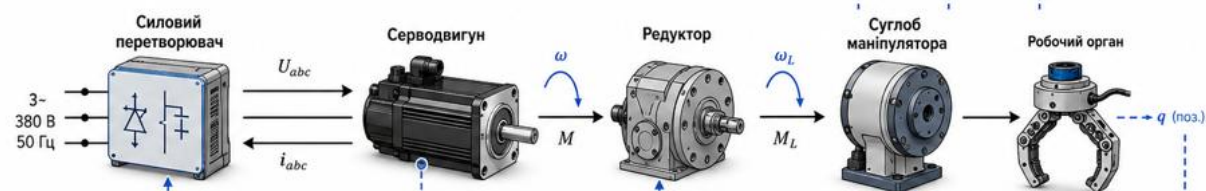
На прикладі Mitsubishi Electric RV-8CRL-D-S15



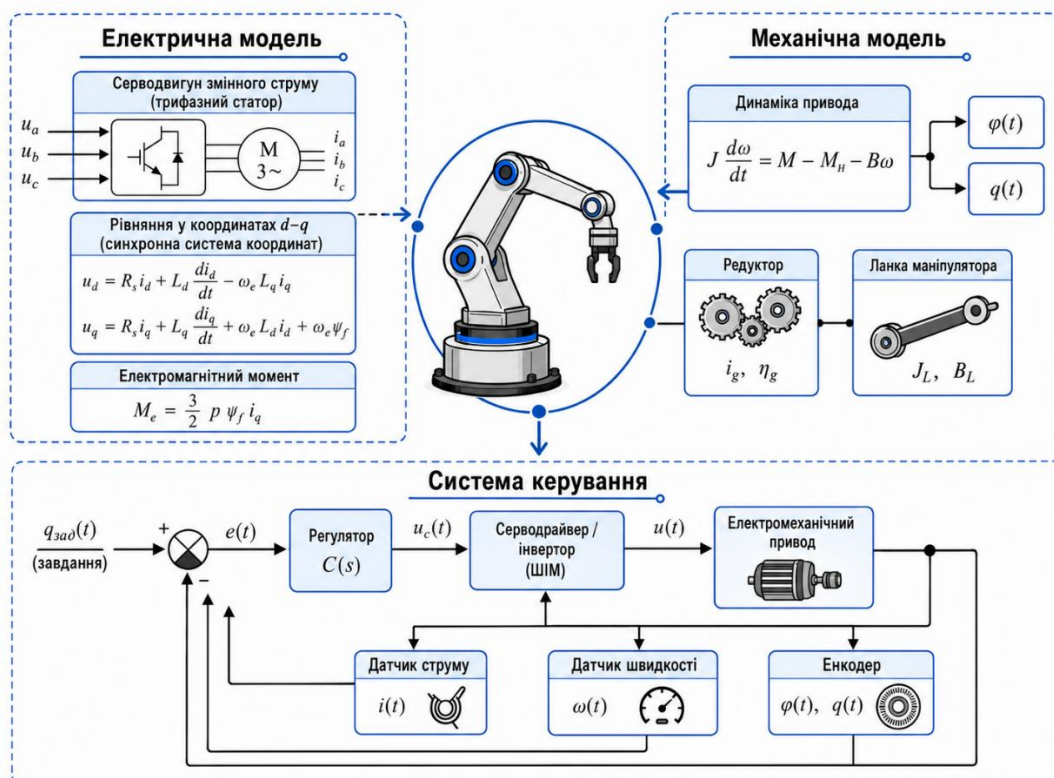
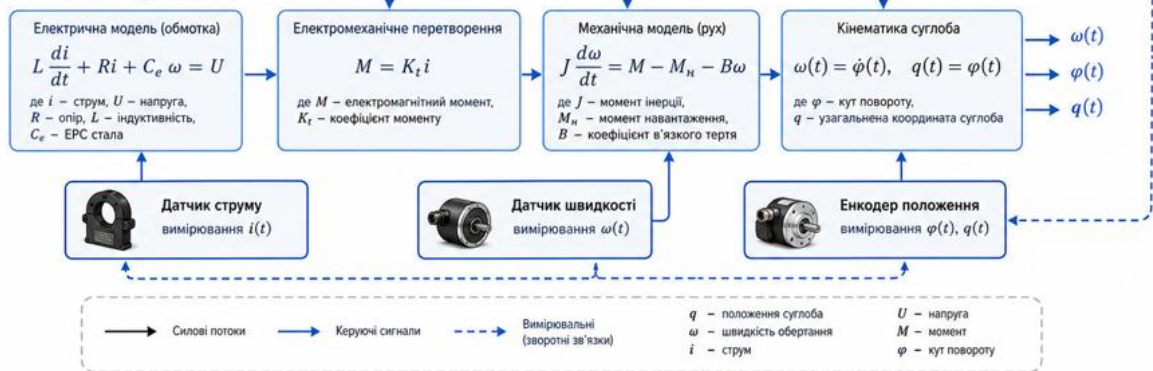
1. КЕРУЮЧИЙ РІВЕНЬ (АЛГОРИТМИ ТА КЕРУВАННЯ)

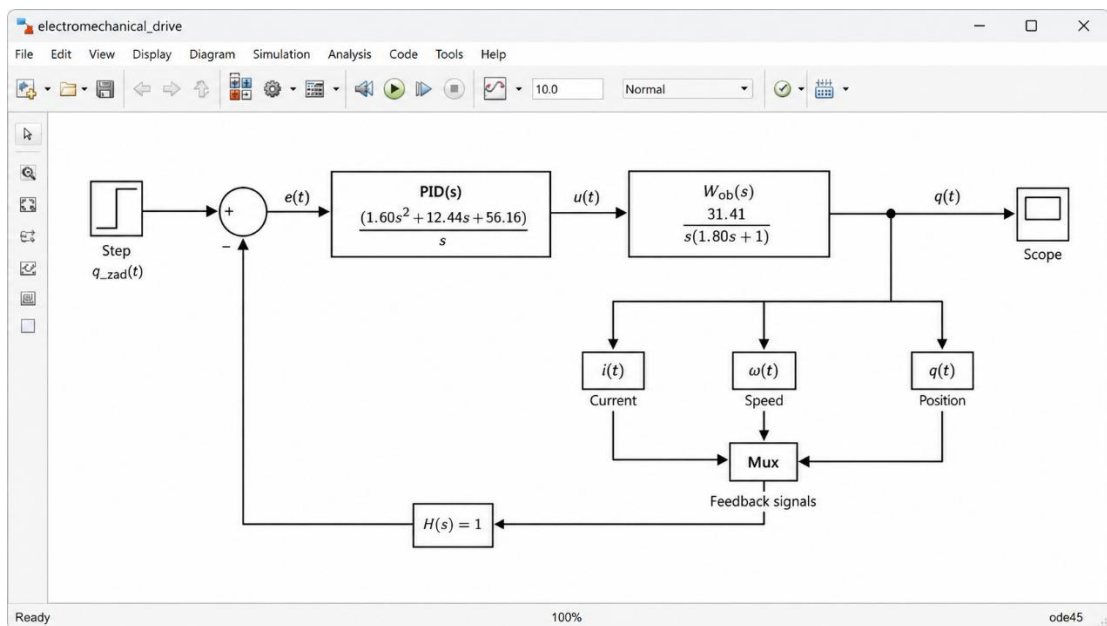
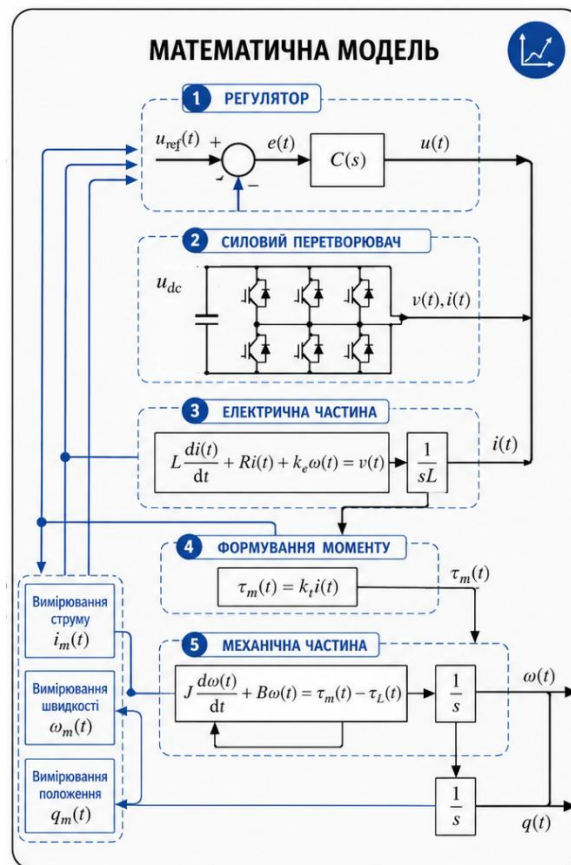


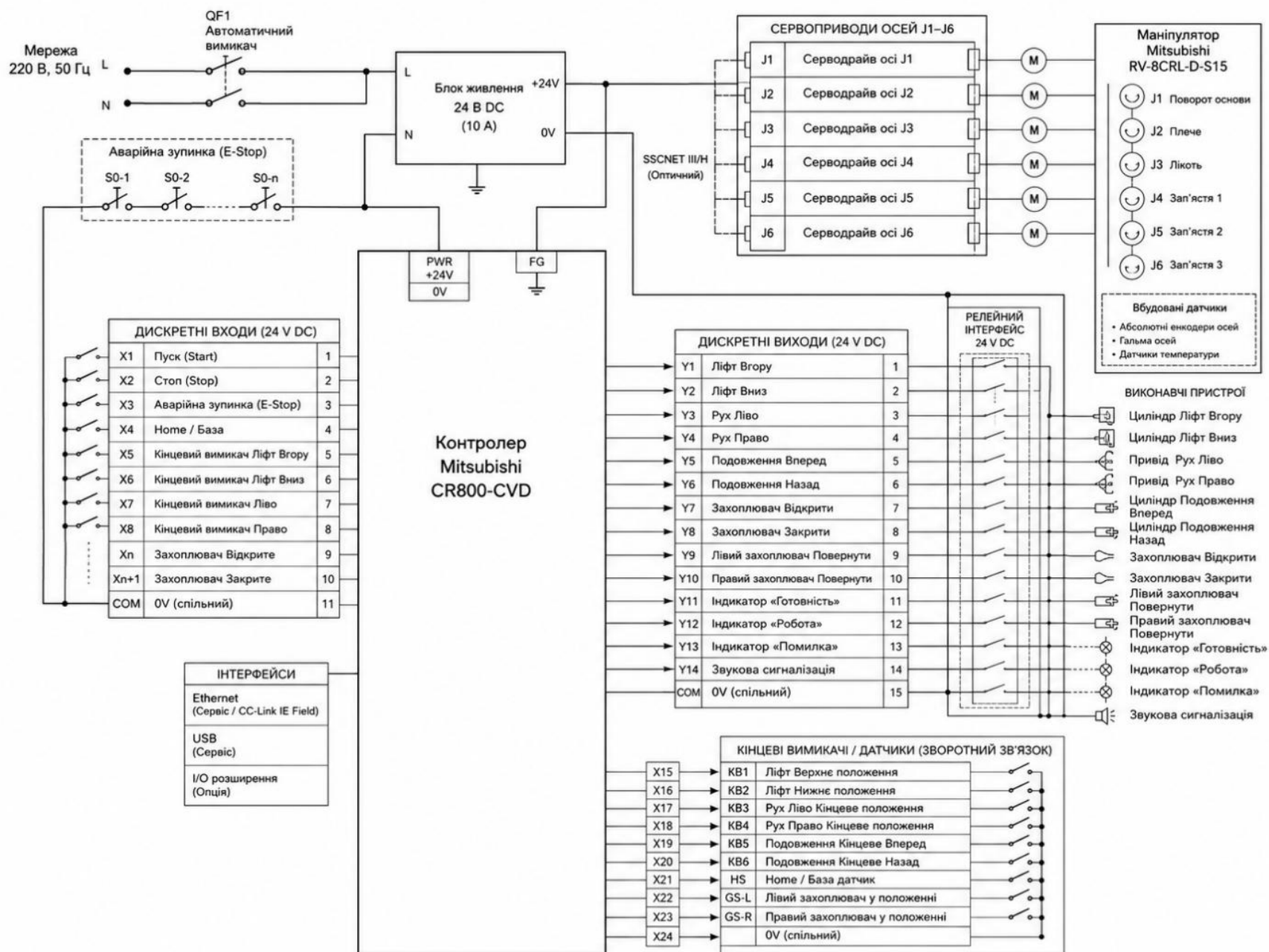
2. СИЛОВИЙ ТА МЕХАНІЧНИЙ РІВЕНЬ (ПРИВІД)

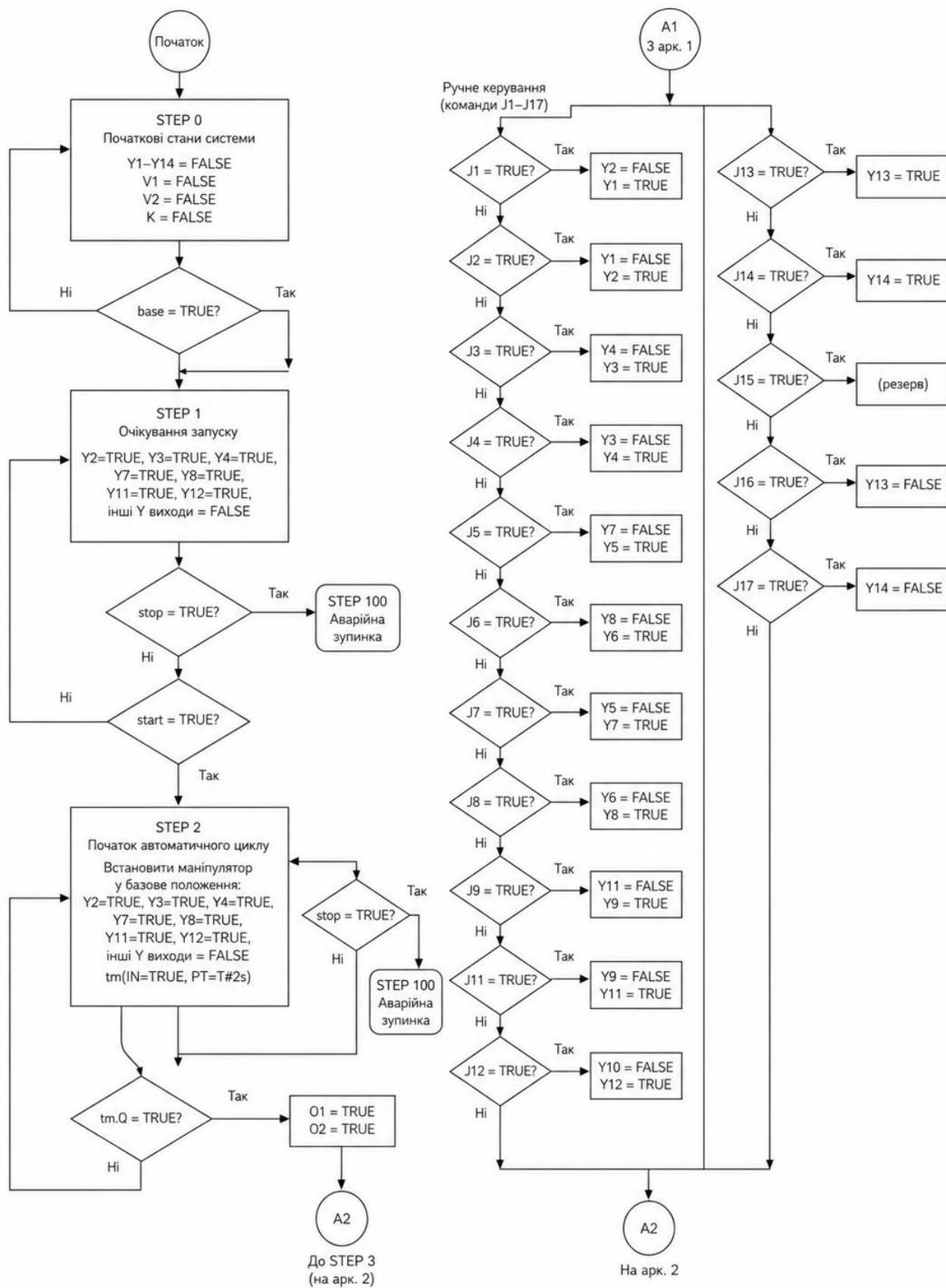


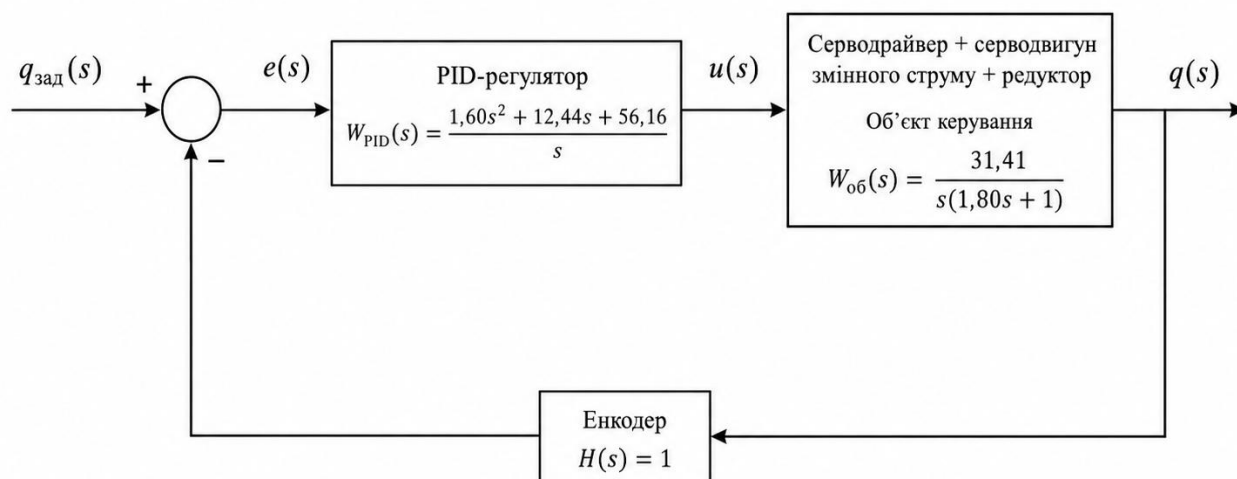
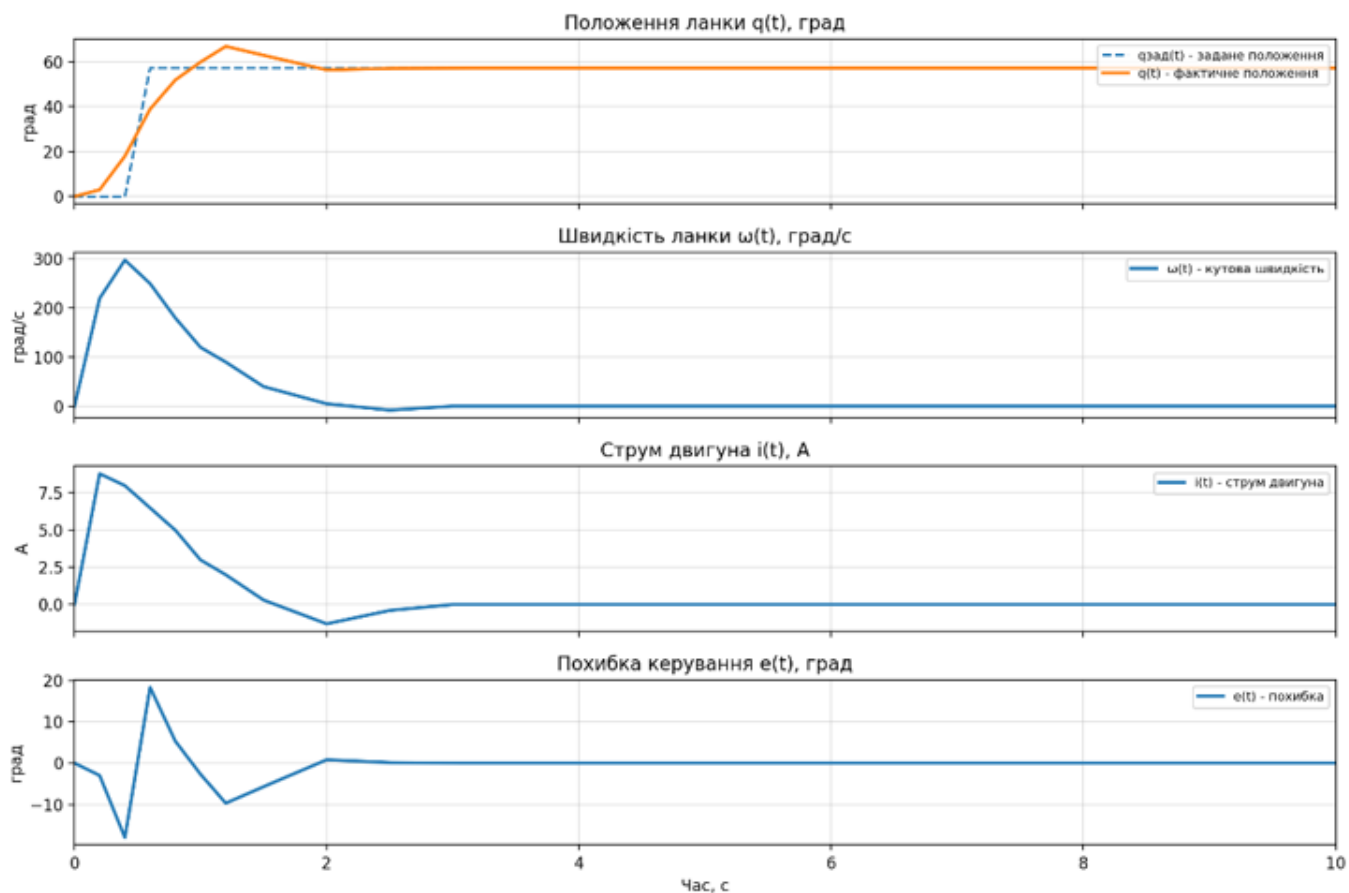
3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА ЗВОРОТНІ ЗВ'ЯЗКИ











Додаток Б

(*

Програма керування електромеханічними приводами промислового маніпуляційного робота.

Алгоритм реалізовано у вигляді покрокового автомата CASE step OF.

Кожен крок відповідає окремому етапу роботи маніпулятора: ініціалізація, очікування запуску, переміщення до верстата, захоплення деталі, перенесення та повернення у початкове положення.

*)

CASE step OF

0: (* Початковий стан системи *)

 (* Вимкнення всіх виконавчих механізмів *)

 Y1 := FALSE;

 Y2 := FALSE;

 Y3 := FALSE;

 Y4 := FALSE;

 Y5 := FALSE;

 Y6 := FALSE;

 Y7 := FALSE;

 Y8 := FALSE;

 Y9 := FALSE;

 Y10 := FALSE;

 Y11 := FALSE;

 Y12 := FALSE;

 Y13 := FALSE;

 Y14 := FALSE;

 V1 := FALSE;

 V2 := FALSE;

 K := FALSE;

 (* Перехід до режиму очікування, якщо база у вихідному положенні *)

 IF base = TRUE THEN

 step := 1;

 END_IF;

```
1: (* Очікування запуску *)

    (* Початкове положення приводів маніпулятора *)
    Y1 := FALSE;
    Y2 := TRUE;

    Y3 := TRUE;
    Y4 := TRUE;

    Y5 := FALSE;
    Y6 := FALSE;

    Y7 := TRUE;
    Y8 := TRUE;

    Y9 := FALSE;
    Y10 := FALSE;

    Y11 := TRUE;
    Y12 := TRUE;

    Y13 := FALSE;
    Y14 := FALSE;

    (* Аварійна зупинка або команда STOP *)
    IF stop = TRUE THEN
        start := FALSE;
        step := 100;
    END_IF;

    (* Ручне керування осями маніпулятора *)
    IF J1 = TRUE THEN
        Y2 := FALSE;
        Y1 := TRUE;
    END_IF;

    IF J2 = TRUE THEN
        Y1 := FALSE;
        Y2 := TRUE;
    END_IF;

    IF J3 = TRUE THEN
        Y4 := FALSE;
        Y3 := TRUE;
    END_IF;
```

```
IF J4 = TRUE THEN
    Y3 := FALSE;
    Y4 := TRUE;
END_IF;
```

```
IF J5 = TRUE THEN
    Y7 := FALSE;
    Y5 := TRUE;
END_IF;
```

```
IF J6 = TRUE THEN
    Y8 := FALSE;
    Y6 := TRUE;
END_IF;
```

```
IF J7 = TRUE THEN
    Y5 := FALSE;
    Y7 := TRUE;
END_IF;
```

```
IF J8 = TRUE THEN
    Y6 := FALSE;
    Y8 := TRUE;
END_IF;
```

```
IF J9 = TRUE THEN
    Y11 := FALSE;
    Y9 := TRUE;
END_IF;
```

```
IF J10 = TRUE THEN
    Y12 := FALSE;
    Y10 := TRUE;
END_IF;
```

```
IF J11 = TRUE THEN
    Y9 := FALSE;
    Y11 := TRUE;
END_IF;
```

```
IF J12 = TRUE THEN
    Y10 := FALSE;
    Y12 := TRUE;
END_IF;
```

```

IF J13 = TRUE THEN
    Y13 := TRUE;
END_IF;

```

```

IF J14 = TRUE THEN
    Y14 := TRUE;
END_IF;

```

```

IF J16 = TRUE THEN
    Y13 := FALSE;
END_IF;

```

```

IF J17 = TRUE THEN
    Y14 := FALSE;
END_IF;

```

```

(* Перехід до автоматичного циклу *)
IF start = TRUE THEN
    stop := FALSE;
    step := 2;
END_IF;

```

2: (* Початок автоматичного циклу *)

```

(* Встановлення маніпулятора у базове положення *)
Y1 := FALSE;
Y2 := TRUE;

Y3 := TRUE;
Y4 := TRUE;

Y5 := FALSE;
Y6 := FALSE;

Y7 := TRUE;
Y8 := TRUE;

Y9 := FALSE;
Y10 := FALSE;

Y11 := TRUE;
Y12 := TRUE;

```

```
Y13 := FALSE;
```

```
Y14 := FALSE;
```

```
(* Таймер витримки перед початком циклу *)
```

```
tm(IN := TRUE);
```

```
tm(PT := T#2s);
```

```
IF tm.Q = TRUE THEN
```

```
    O1 := TRUE;
```

```
    O2 := TRUE;
```

```
    step := 3;
```

```
END_IF;
```

```
IF stop = TRUE THEN
```

```
    step := 100;
```

```
END_IF;
```

```
3: (* Переміщення до верстата №1 *)
```

```
(* Поворот основи до позиції верстата №1 *)
```

```
IF x2 = TRUE THEN
```

```
    Y2 := FALSE;
```

```
    Y1 := TRUE;
```

```
END_IF;
```

```
(* Висування ланки маніпулятора *)
```

```
IF x3 = TRUE THEN
```

```
    Y11 := FALSE;
```

```
    Y9 := TRUE;
```

```
END_IF;
```

```
(* Опускання захоплювача *)
```

```
IF x5 = TRUE THEN
```

```
    Y7 := FALSE;
```

```
    Y5 := TRUE;
```

```
END_IF;
```

```
(* Захоплення деталі *)
```

```
IF x5 = TRUE AND x6 = TRUE THEN
```

```
    Y13 := TRUE;
```

```
    step := 4;
```

```
END_IF;
```

```
IF stop = TRUE THEN
```

```

        step := 100;
    END_IF;

```

4: (* Підйом деталі з верстата №1 *)

```

    (* Після захоплення деталі захоплювач піднімається
*)

```

```

    Y5 := FALSE;
    Y7 := TRUE;

```

```

    IF x7 = TRUE THEN
        V1 := TRUE;
        step := 5;
    END_IF;

```

```

    IF stop = TRUE THEN
        step := 100;
    END_IF;

```

5: (* Переміщення до верстата №2 *)

```

    (* Поворот маніпулятора до другої позиції *)
    Y3 := FALSE;
    Y4 := TRUE;

```

```

    (* Переміщення руки до зони вивантаження *)
    IF x8 = TRUE THEN
        Y12 := FALSE;
        Y10 := TRUE;
    END_IF;

```

```

    IF x4 = TRUE THEN
        step := 6;
    END_IF;

```

```

    IF stop = TRUE THEN
        step := 100;
    END_IF;

```

6: (* Встановлення деталі на верстат №2 *)

```

    (* Опускання захоплювача *)

```

```
Y8 := FALSE;
```

```
Y6 := TRUE;
```

```
(* Розтискання захоплювача *)
```

```
IF x6 = TRUE THEN
```

```
    Y14 := FALSE;
```

```
    Y13 := FALSE;
```

```
    step := 7;
```

```
END_IF;
```

```
IF stop = TRUE THEN
```

```
    step := 100;
```

```
END_IF;
```

```
7: (* Повернення маніпулятора у вихідне положення *)
```

```
(* Піднімання захоплювача *)
```

```
Y6 := FALSE;
```

```
Y8 := TRUE;
```

```
(* Повернення основи *)
```

```
IF x1 = TRUE THEN
```

```
    Y1 := FALSE;
```

```
    Y2 := TRUE;
```

```
END_IF;
```

```
(* Повернення руки у базову позицію *)
```

```
IF x7 = TRUE AND x8 = TRUE THEN
```

```
    Y3 := TRUE;
```

```
    Y4 := TRUE;
```

```
END_IF;
```

```
(* Завершення циклу *)
```

```
IF base = TRUE THEN
```

```
    K := TRUE;
```

```
    step := 1;
```

```
END_IF;
```

```
IF stop = TRUE THEN
```

```
    step := 100;
```

```
END_IF;
```

```
100: (* Аварійна зупинка *)
```

```
Y1 := FALSE;  
Y2 := FALSE;  
Y3 := FALSE;  
Y4 := FALSE;  
Y5 := FALSE;  
Y6 := FALSE;  
Y7 := FALSE;  
Y8 := FALSE;  
Y9 := FALSE;  
Y10 := FALSE;  
Y11 := FALSE;  
Y12 := FALSE;  
Y13 := FALSE;  
Y14 := FALSE;
```

```
V1 := FALSE;  
V2 := FALSE;  
K := FALSE;
```

```
(* Скидання аварійного стану *)  
IF stop = FALSE AND start = FALSE THEN  
    step := 0;  
END_IF;
```

```
END_CASE;
```