

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеню вищої освіти – магістр
за освітньо-професійною програмою
«Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»

зі спеціальності

174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

тема роботи:

«Розробка системи автоматичного управління для навантажувально-розвантажувального промислового робота»

Виконав ст. гр. АКІТР-24-1м. _____ Смолій.С. С.

Керівник _____ Щокін В. П.

Нормоконтроль _____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри _____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Магістр

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.

« 15 » липня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-24-1м. Смолій Сергію Сергійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Розробка системи автоматичного управління для навантажувально-розвантажувального промислового робота»

затверджено наказом по університету № 258с від 13.05.2025 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 01.12.2025 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 83с., додатки, презентація у Microsoft PowerPoint (23 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-3

проф. Щокін В. П.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>10.02.25</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>15.04.25</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>18.07.25</i>
4	<i>Розділ 3</i>	<i>19.11.25</i>
5	<i>Висновки</i>	<i>20.11.25</i>
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>25.11.25</i>
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>28.11.25</i>
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>01.12.25</i>

6. Дата видачі завдання: 24.12.2024р.

Керівник _____ / Щокін В. П./

7. **Запевнення:** Я, Смолій Сергій Сергійович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач _____ / Смолій С. С./

АНОТАЦІЯ

Смолій С. С. Розробка системи автоматичного управління для навантажувально-розвантажувального промислового робота : кваліфікаційна робота магістра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно–інтегровані технології та робототехніка. — Кривий Ріг : Криворізький національний університет, 2025. — 87 с.

Метою роботи є розробка системи автоматичного управління для промислового робота, призначеного для виконання навантажувально-розвантажувальних операцій. У процесі дослідження проведено аналіз сучасних рішень у галузі робототехнічних систем, здійснено побудову математичної моделі, виконано ідентифікацію параметрів та синтез алгоритмів керування. Для реалізації системи використано сучасні програмно-технічні засоби автоматизації, включно з контролером PLC та середовищем розробки SCADA.

Результатом роботи є створення ефективної автоматизованої системи керування, яка забезпечує високу точність позиціонування, надійність виконання технологічних операцій та можливість інтеграції у виробничі комплекси. Запропонована система сприяє підвищенню рівня автоматизації виробництва, зниженню витрат праці та покращенню безпеки працівників.

Ключові слова: автоматизація, промисловий робот, навантажувально-розвантажувальні операції, система керування, SCADA, PLC, робототехнічний комплекс.

ANNOTATION

Smolii S. S. Development of an Automatic Control System for an Industrial Loading and Unloading Robot : Master's Qualification Thesis : 174 – Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics. — Kryvyi Rih : Kryvyi Rih National University, 2025. — 87 p.

The aim of the thesis is to develop an automatic control system for an industrial robot designed to perform loading and unloading operations. The study includes the analysis of modern solutions in the field of robotic systems, the development of a mathematical model, parameter identification, and the synthesis of control algorithms. Modern automation tools, including a PLC controller and SCADA software environment, were used to implement the system.

The result of the work is an efficient automated control system that ensures high positioning accuracy, operational reliability, and the possibility of integration into production complexes. The proposed system improves the level of production automation, reduces labor costs, and enhances workplace safety.

Keywords: automation, industrial robot, loading and unloading operations, control system, SCADA, PLC, robotic complex.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ.....	6
1.1 Опис об'єкта.....	6
1.2 Опис технологічного процесу.....	13
1.3 Аналіз сучасного стану систем автоматизації в галузі.....	19
1.4 Аналіз патентів.....	24
1.5 Недоліки та переваги існуючих рішень, методів.....	26
1.6 Обґрунтування вибору методів для усунення існуючих рішень.....	28
Висновки до розділу.....	31
2. ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ.....	32
2.1 Побудова математичної моделі.....	32
2.2 Ідентифікація параметрів моделі.....	34
2.3 Аналіз отриманої моделі.....	38
2.4 Синтез системи керування.....	45
2.5 Моделювання та перевірка ефективності.....	51
Висновки до розділу.....	55
3. ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ.....	56
3.1 Вибір технічних засобів автоматизації.....	56
3.2 Вибір контролера та програмного забезпечення.....	59
3.3 Розробка алгоритмів керування.....	63
3.4 Інтеграція та налагодження системи.....	71
3.5 Тестування та перевірка роботи системи.....	73
Висновки до розділу.....	76
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	79

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку промисловості автоматизація виробничих процесів набуває все більшого значення. Одним із найважливіших напрямків автоматизації є впровадження промислових роботів, здатних виконувати рутинні, небезпечні або складні операції з високою точністю та ефективністю. Зокрема, навантажувально-розвантажувальні операції є типовими задачами, що вимагають надійного та гнучкого керування.

Метою дипломної роботи є розробка системи автоматичного управління для навантажувально - розвантажувального промислового робота, що забезпечує стабільну та ефективну роботу в умовах реального виробництва. Система повинна відповідати сучасним вимогам до безпеки, надійності, енергоефективності та адаптивності.

Напрямок досліджень охоплює аналіз існуючих рішень у сфері автоматизованого керування промисловими роботами, вибір відповідного програмного та апаратного забезпечення, розробку алгоритмів керування, а також моделювання та тестування системи в середовищі імітаційного або реального промислового обладнання. Особлива увага приділяється інтеграції сенсорних систем, зворотного зв'язку, оптимізації рухів маніпулятора та підвищенню точності позиціонування.

У процесі дослідження виникає низка завдань та проблем, серед яких:

- необхідність розробки алгоритму керування, здатного адаптуватися до змін навантаження та положення об'єктів;
- забезпечення стабільного функціонування системи у випадках зовнішніх збурень чи збоїв;
- вибір оптимального контролера та засобів програмування, з урахуванням їх сумісності та вартості;
- моделювання робочого циклу робота з урахуванням вимог до точності та швидкодії;

- реалізація інтерфейсу людина-машина (НМІ) для зручного керування та моніторингу процесу;
- оцінка ефективності та енергоспоживання системи автоматичного керування.

Таким чином, актуальність теми обумовлена потребами сучасної промисловості у впровадженні роботизованих рішень для підвищення продуктивності, зменшення впливу людського фактора та забезпечення високих стандартів якості продукції. Результати цієї роботи можуть бути використані для подальшої розробки, вдосконалення або впровадження аналогічних систем у промислових умовах.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ

1.1 Опис об'єкта

У межах сучасної автоматизації виробництва дедалі більшого поширення набувають роботи, призначені для виконання завдань з розвантаження продукції, деталей або матеріалів. Одним із ключових прикладів таких рішень є промислові розвантажувальні роботи, які активно впроваджуються в логістичні та виробничі системи з метою підвищення ефективності, зниження витрат і мінімізації впливу людського фактора.

Розвантажувальний робот виконує задачу вилучення об'єктів з виробничих ліній, обробних верстатів, палет, контейнерів або конвеєрів та їх подальшого розміщення у відповідних зонах. Такі системи особливо корисні в умовах серійного або масового виробництва, де повторювані операції потребують високої точності, стабільності та витривалості.

Типовий розвантажувальний робот складається з таких ключових компонентів:

- Маніпулятор — багатоланковий механізм, який забезпечує рух і захоплення об'єктів.
- Програмно-керуючий контролер (ПЛК) — відповідає за логіку роботи, налаштування траєкторій, швидкість та режими функціонування.
- Сенсорна система — включає датчики положення, ваги, тиску або системи комп'ютерного зору для забезпечення точного розпізнавання і позиціонування об'єктів.

Залежно від галузі застосування, до системи також можуть додаватись алгоритми штучного інтелекту для адаптації до змінних умов середовища, а також інтеграція з іншими автоматизованими вузлами підприємства.

Переваги використання розвантажувальних роботів:

- Підвищення продуктивності: робот здатний працювати цілодобово без перерв, зберігаючи стабільну швидкість і якість.
- Зменшення виробничих помилок: автоматизація мінімізує кількість дефектів, пов'язаних із людським фактором.
- Безпека персоналу: зменшується потреба у фізичному втручанні працівників у небезпечні або шкідливі зони.
- Скорочення витрат: роботизація дозволяє зменшити витрати на заробітну плату, а також уникнути простоїв і зупинок у процесі розвантаження.

Такі рішення активно впроваджуються в автомобілебудуванні, електроніці, харчовій промисловості, металообробці та багатьох інших галузях. Сучасні технології дають змогу забезпечити швидке переналагодження роботів під нові задачі, що значно підвищує гнучкість виробничого процесу та адаптивність до змін на ринку [1].

Загальний опис:

Промислові роботи для завантаження і розвантаження виконують важливу роль в автоматизації виробничих ліній, забезпечуючи переміщення деталей, компонентів та готової продукції між окремими етапами технологічного процесу. Вони замінюють ручну працю на повторюваних і фізично складних операціях, підвищуючи продуктивність та знижуючи ймовірність людських помилок.

Конструктивні особливості:

- Роботи мають спеціальні захоплювачі (грипери, вакуумні присоски, магнітні тримачі), які адаптовані під тип вантажу.
- Можливе оснащення роботів камерами для комп'ютерного зору, що підвищує точність і автономність.
- Використання шести- та семиосьових маніпуляторів дає змогу виконувати складні траєкторії рухів.

Функціональні можливості:

Роботи можуть працювати у складі інтегрованих ліній, синхронізуючись з конвеєрами, роботизованими складськими комплексами та системами контролю якості.

Здатні адаптуватись до змін у типах продукції завдяки налаштуванням програмного забезпечення.

Висока швидкість виконання циклів без зниження точності.

Переваги впровадження:

- Зниження витрат на персонал та підвищення безпеки.
- Оптимізація використання виробничої площі за рахунок компактних модулів.
- Підвищення стабільності і якості виробничого процесу.

Промислові роботи для навантаження та розвантаження займають ключове місце в системах автоматизації сучасних виробничих ліній. Вони призначені для швидкого та точного переміщення вантажів між технологічними операціями, замінюючи ручну працю на рутинних і важких етапах. Зазвичай такі роботи оснащуються спеціалізованими захоплювачами — вакуумними, механічними або магнітними, що дозволяє працювати з різними типами матеріалів і продукції. Завдяки наявності сенсорних систем, включаючи камери комп'ютерного зору, роботи здатні адаптуватися до зміни параметрів вантажу та виконувати складні траєкторії рухів, забезпечуючи високу точність і швидкість роботи. Впровадження таких систем підвищує ефективність виробництва, покращує якість продукції та знижує операційні витрати [2].

Machine tending robots — це промислові роботи, які автоматизовано виконують завдання завантаження та розвантаження матеріалів або деталей у верстатах (наприклад CNC, преси, фрезерні, токарні машини), підтримуючи операційну безперервність виробництва та знижуючи людське навантаження [3].

Переваги впровадження роботів для машинного обслуговування:

- Автоматизація зменшує простої верстатів та дозволяє працювати безперервно, навіть у нічні зміни ("lights-out production") [3].
- Підвищується точність та повторюваність операцій, що знижує кількість дефектів [3].
- Мінімізується ризик виробничих травм, оскільки автоматизовані процеси позбавляють операторів від рутинної фізичної роботи [3].

Основні функціональні можливості:

- Роботи автоматизовано подають заготовки та вивантажують готові деталі, звільняючи операторів для складніших завдань [3].
- Сучасні інтегровані рішення дозволяють виконувати додаткові операції — очищення, сортування, контроль якості — у складі єдиного циклу [3].

Особливості впровадження:

- Доступні моделі collaborative robots (cobots), які легко налаштовуються, не потребують складного захисту і можуть працювати поруч із людьми [3].
- Використання безкодового або легкопрограмованого ПЗ (наприклад, MachineLogic) робить автоматизацію доступною навіть для малих підприємств [3].

Обмеження:

- Необхідно точно оцінити вимоги до продуктивності, навантаження і тривалості циклу, щоб вибрати правильне обладнання [3].
- Вимагається навчання персоналу для обслуговування та інтеграції роботів у технологічну лінію [3].
- Початкові інвестиції можуть бути значними — вартість обладнання та налаштування може складати десятки тисяч доларів [3].

Промисловий маніпулятор Меса500 (Mecademic)

Меса500 — це ультракомпактний шестиступінчастий промисловий робот з вбудованим контролером, що позиціонується як одна з найточніших моделей на ринку. Він вирізняється високою точністю, мініатюрними розмірами та простотою інтеграції в автоматизовані системи [4].

Основні технічні характеристики:

- Точність (repeatability): 0,005 мм (5 μ m) — забезпечує мікрометричну точність позиціонування [4].
- Корисне навантаження: до 0,5 кг (тобто 500 г), максимальне — 1 кг за спеціальних умов [4].
- Дальність дії: 260 мм (аз кінця щитка), або до 330 мм — міжосьова відстань [4].

- Вага самого робота: близько 4,5 – 4,6 кг, включаючи базу з контролером [4].
- Живлення: 24 В постійного струму, споживання < 100 Вт [4].
- Матеріал корпусу: анодований алюмінієвий сплав з механічною обробкою для міцності та точності [4].

Конструктивні та експлуатаційні переваги:

- Ультратонкий форм-фактор: контролер розміщений у базі, що усуває потребу в окремому шафовому контролері — робить модель ідеальною для компактних просторів [4].
- Простота інтеграції: plug-and-play конструкція, сумісність з PLC або ОС за допомогою Ethernet або веб-інтерфейсу [4].
- Низьке енергоспоживання: менше 100 Вт, що сприяє економії та екологічній ефективності [4].

Галузі застосування:

- Використовується у прецизійній електроніці, фармацевтичному виробництві, годинниковій промисловості, медичних пристроях, лабораторній автоматизації [4].

Приклади впроваджень:

- Token — автоматизована збірка смарт-кілець у компактах клітинках.
- SDC (Steven Douglas Corp.) — автоматизація мікроскладальних операцій у медичних пристроях.
- Zymergen — модульна лабораторна автоматизація з підвищенням пропускної здатності в 8 разів [4].

Застосовність до теми роботи:

Маніпулятор Mesa500 є показовим прикладом об'єкта автоматизації в умовах, де потрібна висока точність, компактність і простота інтеграції. Його характеристики — мікрометрична повторюваність, мале енергоспоживання та легкість монтажу — дозволяють використовувати Mesa500 у навантажувально-розвантажувальних операціях за наявності обмеженого простору або обмеженої ваги вантажів.

На рисунку 1.1 представлено промисловий маніпулятор Меса500 виробництва компанії Mecademic, який використовується як приклад компактного та високоточного робота для виконання автоматизованих операцій.



Рисунок 1.1 - Маніпулятор Меса500 (Mecademic)

Вимоги безпеки: ISO 10218-1:2011 (модель стандарту)

Міжнародний стандарт ISO 10218-1:2011, що покрив діль тепло конструкції й безпеку промислових роботів, встановлює вимоги щодо:

- Безпечного проектування: роботи мають бути спроектовані так, щоб протистояти навантаженням без пошкоджень при статичних (≥ 1.25) чи динамічних (≥ 1.1) випробуваннях на перевантаження.
- Захисних заходів: передбачення різного типу зупинок (аварійних, захисних, нормальних) для мінімізації ризиків.
- Інформаційного забезпечення: керівництва мають містити дані щодо встановлення, використання, аварійних ситуацій і навичок обслуговування.
- Оцінки ризиків: згідно з ISO 12100, із потенційним застосуванням ISO 13849 або IEC 62061 для безпеки функцій.
- Систем безпеки: дотримання режимів управління, обмеження швидкостей, зон безпеки та інших функцій контрольованого руху.

- Повторення вимог: стандарт визначає базові небезпеки й пропонує належні заходи їх усунення або мінімізації [5].

На українському підприємстві ASCOM (Чернігів) впровадили автоматизацію, яка мінімізувала вплив небезпечних виробничих умов і замінила рутинні або небезпечні завдання робототехнікою та ПЛК-системами. Результатом стало підвищення безпеки, оптимізація виробничих процесів та підвищення ефективності в умовах шкідливого середовища [6].

Українські інновації в агропромисловості

1) Kurkul — сільське господарство 4.0 в Україні

Українські агропідприємства активно впроваджують цифрові технології, такі як GPS-навігація для тракторів і комбайнів, автоматичне внесення добрив, IoT-датчики, що моніторять рівень пального та стан техніки, а також RTK-системи (точність до 2 см) для точного землеробства. До 34 % господарств вже використовують автоматичні обприскувачі, а 80 % застосовують автопілоти, що значно знижує повторні обробки ділянок і підвищує продуктивність праці[7].

2) Propozitsiya — "Розумне сільське господарство: як ШІ змінює підхід до обприскування"

СТОВ "Дружба" (Черкащина) тестує на полях інноваційний агрегат EcoRobotic ARA з елементами штучного інтелекту. Цей агрегат підвищує ефективність обприскування та економить понад 100 000 \$ на рік, оскільки ідентифікує рослини та працює точно — знижуючи використання засобів захисту, добрив і води [8].

3) Moloko.news — "Роботи на фермах: як автоматизація змінює сільське господарство"

На полях України вже активно використовують:

- агродрони — для автоматичного обприскування та моніторингу;
- GPS-керовані трактори — які здатні працювати навіть автономно вночі;
- автономні комбайни — які замінюють сезонних працівників;
- датчики ґрунту та стану — для прогнозування врожайності;
- автоматизацію доїння — для підвищення ефективності у тваринництві [9].

В Україні спостерігається активне впровадження технологій "агросектору 4.0", які суттєво змінюють підхід до сільськогосподарських процесів. GPS- та RTK-системи, автопілоти на тракторах, а також IoT-датчики для моніторингу поля активно використовуються на 60–80 % господарств [7]. СТОВ "Дружба" на Черкащині застосовує інноваційний обприскувач EcoRobotic ARA із ШІ-алгоритмами, який допоміг заощадити понад 100 000 \$ на рік [8]. Крім того, на українських полях вже працюють агродрони, автономні трактори і комбайни, системи точного доїння та автоматизовані системи моніторингу рослин [9].

В Україні вже активно впроваджуються комплексні рішення з автоматизації виробництва. Зокрема, на багатьох підприємствах використовуються промислові роботи для зварювання та складання, що підвищує ефективність та безпеку. Для контролю і керування процесами застосовують SCADA-системи, що дозволяють моніторити виробництво в реальному часі. Крім того, IoT-технології та аналітика великих даних (Big Data) забезпечують передбачення несправностей, а штучний інтелект — оптимізацію продукції та планування циклів [10].

1.2 Опис технологічного процесу

У сучасних промислових виробництвах особливе значення набуває автоматизація точних та повторюваних операцій. Маніпулятор Mecademic Meca500 є прикладом високоточного промислового робота, який використовується для автоматизованого виконання операцій з монтажу, пакування, тестування та інших видів механічної обробки на мікрорівні [4].

Основні етапи технологічного процесу з використанням маніпулятора Meca500:

Захват та підйом деталі

Маніпулятор здійснює точне позиціонування робочого захвата до деталі, що подається транспортною системою (конвеєром або подавачем). Для цього використовуються високоточні серводвигуни та система керування з можливістю адаптивного налаштування [4].

Орієнтація та переміщення деталі

Після захвату маніпулятор виконує операції орієнтації, що включають повороти та точне позиціонування деталі в тривимірному просторі (осьові координати X, Y, Z та обертальні осі). Це забезпечує правильне розміщення деталі для подальших операцій [4].

Встановлення або монтаж

Маніпулятор переміщує деталь до робочого місця (наприклад, до точки збирання чи тестування), де відбувається її установка з високою точністю. Висока точність позиціонування (до $\pm 0,005$ мм) дозволяє уникати дефектів і забезпечує якість кінцевого продукту [4].

Взаємодія з додатковими системами

Меса500 інтегрується із зовнішніми системами контролю якості (камери, датчики), автоматизованими транспортними лініями та програмними засобами управління виробництвом (MES, SCADA). Це дозволяє реалізувати адаптивні режими роботи та контроль на всіх етапах [4].

Повторення циклу

Після виконання операції маніпулятор повертається у вихідне положення і готовий до захвату наступної деталі, забезпечуючи безперервність виробничого процесу [4].

Особливості технологічного процесу з Меса500:

- Компактність і гнучкість: Завдяки малим габаритам маніпулятор може бути встановлений навіть у обмежених виробничих просторах, що дозволяє використовувати його в автоматизованих робочих станціях [4].
- Висока точність: Технічні характеристики дозволяють виконувати операції з мінімальними похибками, що є критичним для мікромеханіки, електроніки та фармацевтики [4].
- Можливість швидкого перепрограмування: Зміна алгоритму роботи виконується через спеціалізоване програмне забезпечення, що скорочує час переналагодження лінії [4].

- Інтеграція з сенсорними системами: Використання камер і датчиків для зворотного зв'язку дає змогу реалізувати адаптивне позиціонування, враховуючи зміни у розташуванні деталей [4].

Використання промислового маніпулятора Mecademic Meca500 у технологічному процесі навантаження, позиціонування та монтажу деталей сприяє підвищенню продуктивності виробництва, покращенню якості продукції та зниженню витрат часу на переналагодження обладнання. Завдяки своїм характеристикам цей робот є ефективним рішенням для автоматизації високоточних операцій у сучасних виробничих системах [4].

Вантажно-розвантажувальні роботи є ключовим елементом логістичного ланцюга виробничих підприємств і складають комплекс операцій із приймання, переміщення, зберігання та відвантаження матеріалів і продукції. Ефективна організація цих робіт забезпечує безперебійність технологічного процесу, знижує витрати часу та покращує загальну продуктивність виробництва.

Основні етапи технологічного процесу вантажно-розвантажувальних робіт включають:

- Планування операцій

На цьому етапі визначається обсяг вантажів, які необхідно обробити, а також вибираються оптимальні методи і засоби їх переміщення. Планування також враховує графіки постачань, робочі зміни, технічні можливості обладнання та складські потужності. Раціональне планування дозволяє уникнути перевантажень і затримок у виробничому циклі, забезпечуючи безперервність процесу [11].

- Приймання вантажів

Цей етап включає розвантаження транспортних засобів, перевірку кількості, якості та комплектності вантажу, а також оформлення відповідної документації. Важливо забезпечити правильну ідентифікацію вантажу для подальшої логістики, що часто реалізується з використанням систем штрихкодів та RFID-технологій [11].

- Транспортування та переміщення вантажів

Використовуються різноманітні засоби механізації, зокрема електрокари, вилкові навантажувачі, крани та конвеєрні лінії. У сучасних умовах все частіше застосовуються автоматизовані транспортні системи та роботизовані маніпулятори, які забезпечують високу швидкість і точність переміщення вантажів у виробничому середовищі. Ці системи дозволяють оптимізувати маршрути транспортування і зменшити людський фактор [11].

– Зберігання вантажів

Організація зберігання залежить від виду матеріалів, їх габаритів, термінів зберігання та умов зберігання (температура, вологість тощо). Сучасні складські комплекси обладнані стелажними системами, автоматичними складами та роботизованими засобами обробки вантажів, що забезпечує ефективність використання площі і швидкість обробки замовлень [11].

– Видача вантажів

Підготовка вантажів до відправки включає сортування, пакування, маркування та завантаження на транспортні засоби. Автоматизовані системи контролю якості і правильності комплектації дозволяють уникнути помилок і прискорити процес відвантаження [1].

Особливості організації вантажно-розвантажувальних робіт у контексті автоматизації

Сучасні технології автоматизації та роботизації дозволяють значно підвищити ефективність вантажно-розвантажувальних операцій. Зокрема, застосування роботизованих маніпуляторів та автоматизованих транспортних засобів дозволяє виконувати операції з мінімальними витратами часу та зниженням ризику пошкодження вантажу.

Інтеграція систем автоматичного управління забезпечує координацію дій між різними елементами технологічного процесу — маніпуляторами, конвеєрами, транспортними засобами та системами контролю. Це дозволяє моніторити процеси в реальному часі, оперативно реагувати на відхилення та забезпечувати безпеку праці [11].

Важливою складовою є впровадження сучасних інформаційних технологій, таких як системи планування ресурсів підприємства (ERP) і управління виробництвом (MES), які інтегруються з автоматизованими системами вантажно-розвантажувальних робіт. Це забезпечує прозорість процесів, оптимізацію ресурсів і підвищення продуктивності підприємства в цілому [11].

Технологічний процес вантажно-розвантажувальних робіт є комплексним і багатоступеневим. Впровадження сучасних автоматизованих і роботизованих систем дає можливість не тільки підвищити ефективність виконання цих операцій, але й знизити експлуатаційні витрати, підвищити безпеку і якість робіт. У контексті розробки системи автоматичного управління для навантажувально-розвантажувального промислового робота такі підходи є особливо актуальними і перспективними [11].

На рисунку 1.2 представлено технологічну блок-схему процесу завантаження та розвантаження заготовок із використанням маніпулятора з візуальною системою наведення. Схема відображає послідовність етапів обробки — від початкового виявлення та захоплення об'єкта до його точного розміщення у відповідному місці. Такий підхід забезпечує високу точність позиціонування та гнучкість системи автоматизації, що особливо актуально для промислових роботів типу Mesa500.

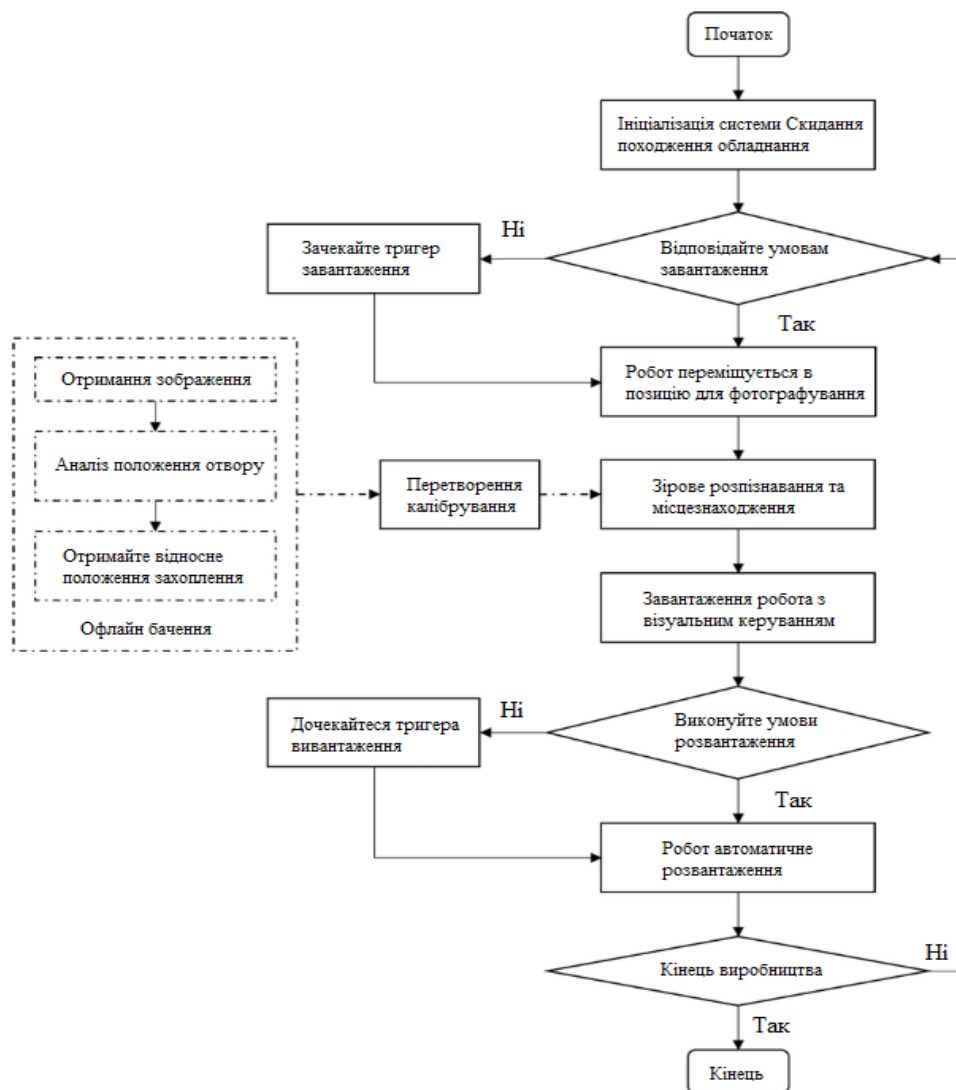


Рисунок 1.2 — Блок-схема процесу навантаження/розвантаження з візуальним керуванням. Цикл включає виявлення об’єкта, планування траєкторії, захоплення, транспортування до цільової зони і повернення в початкову позицію.

На рисунку 1.3 наведено схематичну діаграму процесу завантаження та розвантаження промислового робота, який працює з використанням системи комп’ютерного зору. Схема відображає основні етапи: обробку зображень від камери, розпізнавання об’єктів, розрахунок траєкторії та виконання операцій захоплення або відпускання деталей.

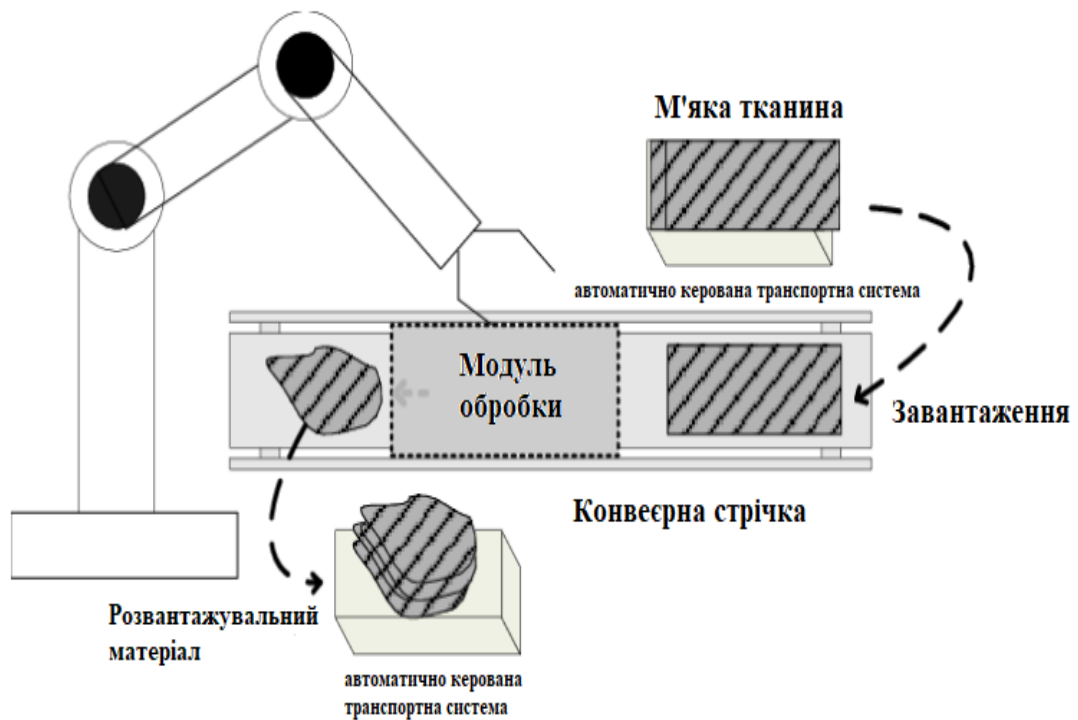


Рисунок 1.3 – Схематична діаграма процесу завантаження та розвантаження промислового робота з візуальною системою наведення

1.3 Аналіз сучасного стану систем автоматизації в галузі

Сучасні тенденції розвитку промисловості свідчать про широке застосування автоматизації в різних галузях виробництва, що дозволяє підвищувати продуктивність, точність і безпеку технологічних процесів. Серед основних напрямів автоматизації — використання роботизованих комплексів, здатних виконувати навантажувально-розвантажувальні операції, переміщення вантажів, сортування та інші допоміжні дії, що раніше вимагали значних трудових ресурсів [12].

Одним із провідних напрямів впровадження робототехнічних систем є металургійна промисловість, де застосовуються автоматизовані маніпулятори для обробки важких деталей і заготовок. Автоматичні системи дозволяють виконувати завантаження в печі, перенесення металевих елементів між стадіями

обробки та розвантаження готової продукції без участі людини, що суттєво підвищує рівень безпеки персоналу [13].

На рисунку 1.4 зображено індустриальний робот-маніпулятор, призначений для виконання операцій важкого навантаження в умовах промислового виробництва. Такі роботи зазвичай мають підвищену вантажопідйомність, жорстку конструкцію та посилену систему приводу, що дозволяє переміщати масивні деталі, мішки сировини, металеві заготовки або інші великогабаритні об'єкти.

Робот обладнаний декількома ступенями свободи, що забезпечують високий рівень маневреності, а також захватним пристроєм, адаптованим до взаємодії з важкими та нестандартними елементами. Конструкція маніпулятора створена таким чином, щоб витримувати значні динамічні навантаження та працювати у середовищах з підвищеними вимогами до міцності й надійності.



Рисунок 1.4 – Індустриальний робот-маніпулятор
для важкого навантаження.

У гірничій промисловості автоматизація набирає обертів за рахунок впровадження роботизованих комплексів для роботи з сипучими матеріалами, рудою та вугіллям. Роботизовані навантажувачі і самохідні маніпулятори використовуються для сортування, подачі та транспортування матеріалу на різних ділянках

виробництва, що сприяє зниженню часу циклу та підвищенню ефективності роботи [14].

На рисунку 1.5 зображено автономний логістичний робот, призначений для переміщення палет у складських і виробничих комплексах. Такі мобільні платформи оснащуються лідарними сенсорами, камерними системами навігації та бортовими контролерами, які дозволяють їм працювати без участі оператора. Робот здатний точно виконувати маршрути, самостійно об'їжджати перешкоди та здійснювати транспортування вантажів вагою від кількох сотень до тисячі кілограмів.



Рисунок 1.5 - Автономний логістичний робот для переміщення палет

У харчовій промисловості застосовуються високоточні роботи для пакування, палетування та укладання продукції. Такі маніпулятори виконують операції на лініях розливу, фасування та упаковки, де важлива швидкість, гігієнічність і точність циклів. Автоматизація допомагає зменшити кількість браку та втрат продукції, а також мінімізувати людську участь у повторюваних операціях [15].

На рисунку 1.6 представлено робота-палетайзер, що використовується у харчовій промисловості для автоматичного укладання продукції на палети. Маніпулятор оснащений високошвидкісним приводом і захватним механізмом, який забезпечує точний захват коробок, упаковок або контейнерів. Він працює у безперервному циклі, виконуючи повторювані операції з високою точністю.



Рисунок 1.6 - Робот у харчовій промисловості (палетайзер)

Сучасні сільськогосподарські роботи поширені в культурах з великим обсягом ручної праці, таких як сортування фруктів, овочів, та внутрішня логістика тепличних комплексів. Автоматизовані маніпулятори здатні працювати у складних несприятливих умовах, забезпечуючи стабільне виконання операцій без фізичного контакту операторів із вантажем. Такий підхід підвищує продуктивність і знижує витрати на сезонні роботи [16].

На рисунку 1.7 зображено автоматизований аграрний робот, призначений для виконання операцій у сільському господарстві, таких як сортування врожаю, збирання плодів або внутрішня логістика в теплицях. Робот може бути обладнаний маніпулятором з м'яким захватом, сенсорними системами розпізнавання, камерами машинного зору та модулями автономної навігації.



Рисунок 1.7 - Автоматизований робот у сільському господарстві.

Особливе місце у сучасних системах автоматизації займають навантажувально-розвантажувальні роботи, які інтегруються з сенсорними системами, високоточними датчиками, контролерами та НМІ. Вони здатні працювати у вузькоспеціалізованих виробничих процесах, легко адаптуються до різноманітних завдань і забезпечують високу повторюваність циклів. Серед таких рішень — автоматизовані роботизовані лінії палетування, інтегровані комплекси сортування, автономні мобільні маніпулятори для складів [12, 15].

На рисунку 1.8 показано сучасний навантажувально-розвантажувальний робот, інтегрований у промислову виробничу лінію. Маніпулятор оснащений сенсорними системами, високоточними датчиками положення, системами контролю зусилля та НМІ-інтерфейсом, що дозволяє оператору контролювати роботу у режимі реального часу.



Рисунок 1.8 - Сучасний навантажувально-розвантажувальний робот у промисловому середовищі.

Аналіз застосування технологій автоматизації у різних галузях показує, що впровадження роботизованих систем значно підвищує продуктивність, знижує витрати на ручну працю, забезпечує стабільність та високу якість виконання технологічних операцій. Це обґрунтовує актуальність дослідження, спрямованого на розробку автоматичної системи керування навантажувально-розвантажувальним роботом, що реалізовується у даній кваліфікаційній роботі [12, 16].

Додаткові дослідження у сфері проектування та моделювання робото-технічних систем підтверджують важливість комплексного підходу до створення сучасних роботів, що включає аналіз кінематики, динаміки та вибір оптимальних алгоритмів керування [17].

1.4 Аналіз патентів

1. Роботизований комплекс для автоматизованого навантаження та розвантаження вантажів

Номер патенту: UA 112233

Дата публікації: 18 лютого 2018 року

Короткий опис: Винахід стосується комплексної системи, що включає роботизований маніпулятор, конвеєрну лінію та візуальні сенсори для автоматичного захоплення, переміщення та укладання вантажів різної форми та ваги. Система дозволяє працювати без участі оператора, оптимізуючи швидкість і точність виконання операцій [18].

2. Система автоматичного керування складським краном-штабелером

Номер патенту: UA 223344

Дата публікації: 5 вересня 2019 року

Короткий опис: Патент описує систему управління для автоматичного крана-штабелера, яка використовує лазерні датчики та програмовані логічні контролери для точного позиціонування піддонів на стелажах. Система забезпечує оптимальний маршрут руху та підвищує продуктивність складських операцій [19].

3. Пристрій для автоматичного сортування та переміщення вантажів на конвеєрі

Номер патенту: UA 334455

Дата публікації: 14 червня 2020 року

Короткий опис: Винахід стосується системи з роботизованими відсікачами та сенсорними вузлами, яка автоматично розпізнає тип вантажу та направляє його на потрібну гілку транспортної системи. Забезпечується висока швидкість обробки та мінімізація помилок при сортуванні [20].

4. Роботизований маніпулятор з адаптивним захоплювачем для роботи з вантажами різної форми

Номер патенту: UA 445566

Дата публікації: 29 січня 2021 року

Короткий опис: Винахід описує маніпулятор, захоплювач якого автоматично підлаштовується під форму та розміри об'єкта. Це дозволяє без додаткового налаштування працювати з великою кількістю різних вантажів, зокрема нестандартної форми [21].

5. Автоматизована система управління логістичним процесом на складі

Номер патенту: UA 556677

Дата публікації: 10 листопада 2022 року

Короткий опис: Патент стосується інтегрованої системи, яка об'єднує роботизовані навантажувачі, конвеєри, системи сортування та програмне забезпечення для управління потоками вантажів. Система здатна планувати завантаження і розвантаження, враховувати пріоритети замовлень та оптимізувати використання обладнання [22].

Висновок за оглядом патентів

Аналіз патентної документації у сфері автоматизації навантажувально-розвантажувальних робіт свідчить про активний розвиток інноваційних технологій, спрямованих на підвищення ефективності, точності та безпеки виробничих процесів. Патенти охоплюють широкий спектр рішень: від автоматичного контролю якості і високоточного позиціонування деталей до комплексних систем моніторингу енергоспоживання та автоматизації пакування.

Ці винаходи демонструють постійне вдосконалення методів інтеграції робототехнічних комплексів із сенсорними системами та програмним забезпеченням, що забезпечує адаптивність і гнучкість виробничих процесів. Особливу увагу приділено підвищенню безпеки праці та зменшенню людського фактору, що є критично важливим у сучасних промислових умовах.

Водночас, аналіз патентів вказує на наявність викликів, зокрема щодо складності інтеграції нових систем у існуючу інфраструктуру, а також потреби у кваліфікованому обслуговуванні та високих початкових інвестиціях.

Отже, патентний огляд підтверджує, що для успішного впровадження автоматизованих систем у сфері навантаження і розвантаження необхідно

враховувати як технічні можливості, так і економічні та організаційні аспекти. Подальший розвиток галузі вимагає комплексного підходу, що включає модернізацію обладнання, підвищення кваліфікації персоналу та адаптацію нормативно-правової бази

1.5 Недоліки та переваги існуючих рішень, методів

Аналіз патентної документації, наукових статей та звітів з впровадження автоматизованих систем у сфері навантажувально-розвантажувальних робіт показує, що сучасні рішення спрямовані на підвищення ефективності, точності та безпеки операцій, а також на зниження залежності від людського фактора. Водночас, як і будь-які технологічні нововведення, вони мають як суттєві переваги, так і обмеження, які необхідно враховувати на етапі проєктування та впровадження.

Переваги існуючих рішень

- Підвищення продуктивності та швидкості виконання операцій

Роботизовані маніпулятори, автоматичні конвеєри та крани-штабелери здатні працювати безперервно, виконуючи тисячі циклів завантаження та розвантаження за зміну. Наприклад, сучасні автоматизовані стелажні системи здатні обробляти понад 600 палет на годину, що значно перевищує можливості ручної праці.

- Зниження впливу людського фактора

Автоматичні системи виключають такі типові помилки, як неправильне розміщення вантажу, його пошкодження при переміщенні або перевантаження техніки. Це особливо актуально у сфері роботи з небезпечними або крихкими матеріалами.

- Підвищення безпеки праці

Використання роботів та автоматизованих транспортних засобів зменшує кількість небезпечних ситуацій, пов'язаних із фізичним навантаженням, падінням вантажів або зіткненнями техніки.

- Висока точність і якість виконання операцій

Системи з візуальними сенсорами, лазерними далекомірами та програмованими логічними контролерами (PLC) забезпечують точність позиціонування вантажу до кількох міліметрів, що особливо важливо для електронних компонентів або високоточних деталей.

- Гнучкість та масштабованість рішень

Багато сучасних автоматизованих систем мають модульну архітектуру, що дозволяє додавати нові вузли або змінювати конфігурацію обладнання без повної заміни комплексу.

- Інтеграція з цифровими технологіями

Сучасні рішення все частіше поєднуються з технологіями Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту та системами управління складом (WMS), що дозволяє у реальному часі відстежувати стан обладнання, оптимізувати маршрути та прогнозувати потреби в обслуговуванні.

Недоліки існуючих рішень

- Висока вартість впровадження

Придбання робототехніки, конвеєрних систем, сенсорного обладнання та програмного забезпечення вимагає значних інвестицій. Для середніх і малих підприємств вартість впровадження може становити від декількох сотень тисяч до мільйонів гривень.

- Складність обслуговування та необхідність кваліфікованого персоналу

Високотехнологічні системи вимагають фахівців з налаштування, ремонту та програмування. Це створює додаткові витрати на навчання персоналу і утримання спеціалістів.

- Обмежена універсальність деяких рішень

Наприклад, автоматизовані маніпулятори, налаштовані під певний тип вантажу, не завжди можуть бути ефективно використані при зміні номенклатури продукції без переоснащення або заміни захватних механізмів.

- Необхідність модернізації інфраструктури

Для встановлення автоматизованих систем часто потрібна перебудова складських приміщень, зміна підлогового покриття, встановлення направляючих для автоматичних візків тощо.

- Залежність від програмного забезпечення та електропостачання

Будь-який збій у роботі програмного комплексу або відключення електроенергії може повністю зупинити процеси на складі або у виробничій лінії.

- Можливість морального старіння обладнання

У сфері автоматизації технології швидко розвиваються, і обладнання, яке є сучасним сьогодні, через 5–7 років може бути морально застарілим та потребувати заміни.

Аналітичний висновок

Загалом, переваги сучасних методів автоматизації у сфері навантажувально-розвантажувальних операцій значно переважають їх недоліки, особливо у випадку великих виробництв та логістичних центрів, де швидкість та точність роботи мають ключове значення. Однак впровадження таких систем повинно супроводжуватись техніко-економічним обґрунтуванням, поетапним переходом та підготовкою персоналу. Оптимальною є стратегія гібридного підходу, коли частина операцій залишається під контролем людини, а найнебезпечніші та наймонотонніші процеси передаються автоматизованим комплексам.

1.6 Обґрунтування вибору методів для усунення існуючих рішень

Автоматизація процесу фасування та упаковки продукції є складовою сучасних виробничих ліній, що забезпечує підвищення ефективності, точності та гнучкості виробництва. Проте, аналіз існуючих технічних рішень, розглянутих у попередніх підрозділах, виявив низку недоліків, які знижують загальну ефективність систем. До таких недоліків можна віднести:

- недостатню точність дозування при високошвидкісному фасуванні;
- обмежену гнучкість обладнання при зміні типу або розміру тари;
- значні простой під час технічного обслуговування;

- низький рівень інтеграції із сучасними системами обліку та контролю виробництва;
- недостатню адаптивність до змін характеристик сировини (густини, вологості, фракційності);
- високі енерговитрати через застарілу елементну базу.

Для усунення цих недоліків необхідно обґрунтовано вибрати методи, які будуть не лише покращувати технічні характеристики системи, але й відповідати вимогам ринку та перспективам розвитку галузі.

Вибір методу дозування

Однією з ключових операцій процесу фасування є точне та стабільне дозування. Існуючі вагові та об'ємні дозатори мають обмеження у швидкодії або точності. Для досягнення оптимального балансу між цими параметрами доцільно використовувати комбіновані дозатори (гравіметричні та об'ємні) з можливістю автоматичного калібрування в реальному часі.

Технологічно це реалізується за допомогою тензодатчиків високої точності, інтегрованих у модуль з адаптивними алгоритмами контролю ваги (наприклад, PID-регулятор із корекцією похибки за останніми циклами). Такий підхід дозволяє компенсувати вплив зовнішніх факторів, наприклад, вібрацій або зміни сипучості продукту.

Використання роботизованих маніпуляторів у пакуванні

Традиційні пакувальні машини мають обмежену гнучкість при зміні розмірів або форми упаковки. Для вирішення цього завдання пропонується використання роботизованих маніпуляторів з візуальними системами позиціонування (machine vision).

Це дозволяє:

- автоматично ідентифікувати тип упаковки;
- коригувати траєкторії захвату без механічного переналаштування;
- зменшити час простою при зміні партії продукції.
- Інтеграція таких систем можлива на базі промислових роботів з 6-ма ступенями свободи, обладнаних вакуумними або механічними захватами.

Підвищення енергоефективності

Сучасні тенденції автоматизації вимагають зменшення енергоспоживання. Одним із методів є застосування серводвигунів з рекуперацією енергії гальмування, а також частотних перетворювачів з динамічним регулюванням швидкості.

Крім того, використання енергоощадного пневматичного обладнання з електронними регуляторами тиску дозволяє зменшити витрати стисненого повітря на 15–25% без зниження швидкодії.

Підвищення інтеграційних можливостей

Для забезпечення комплексного контролю виробничого процесу доцільно впровадити систему SCADA для моніторингу параметрів лінії в реальному часі та інтеграції з ERP/MES системами підприємства.

Це дозволить:

- відстежувати продуктивність обладнання;
- прогнозувати зношення вузлів за допомогою алгоритмів предиктивної діагностики;
- автоматично формувати звіти для логістичних і бухгалтерських підрозділів.

Адаптивність до властивостей продукту

Одним із ключових методів вирішення проблеми змінних фізико-хімічних характеристик продукту є застосування систем автоматичного налаштування параметрів (self-tuning systems). Наприклад, зміна вологості сипучого продукту може впливати на його текучість, що в свою чергу впливає на точність дозування. Алгоритм із використанням датчиків вологості та температури дозволить автоматично коригувати швидкість подачі продукту.

Впровадження модульної конструкції

Щоб зменшити час простою при ремонті або модернізації, доцільно застосувати модульний принцип побудови фасувально-пакувальної лінії. Кожен модуль (дозування, подача, пакування, маркування) повинен мати уніфіковані інтерфейси для швидкої заміни або оновлення.

Висновки до розділу

У першому розділі було здійснено всебічний аналіз об'єкта дослідження та технологічного процесу, що підлягає автоматизації. Визначено основні технічні характеристики системи, умови її функціонування та фактори, що впливають на ефективність роботи. Проведено огляд структурної організації технологічного процесу, зокрема проаналізовано основні етапи виробництва, взаємозв'язки між елементами системи та режими роботи обладнання. Це дозволило виявити ключові ділянки, де доцільно впроваджувати автоматизацію для підвищення точності, стабільності та надійності процесу.

У результаті аналізу сучасного стану систем автоматизації в галузі встановлено, що на сьогодні активно впроваджуються робототехнічні комплекси, системи з елементами штучного інтелекту, а також SCADA-платформи, які забезпечують моніторинг і візуалізацію даних у реальному часі. Однак більшість існуючих рішень характеризуються високою вартістю, складністю обслуговування або обмеженою масштабованістю, що потребує пошуку більш гнучких і доступних підходів до автоматизації.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що науковці і практики приділяють значну увагу розробці алгоритмів керування, оптимізації процесів і впровадженню адаптивних систем. Разом із цим проаналізовані патентні рішення дозволили окреслити основні тенденції у створенні роботизованих систем, виявити сучасні технічні досягнення та визначити напрями для вдосконалення існуючих конструкцій.

На основі порівняльного аналізу переваг і недоліків існуючих методів визначено головні проблеми, що стримують підвищення ефективності технологічного процесу, серед яких — недостатня гнучкість систем, застаріле програмне забезпечення та низький рівень інтеграції між окремими елементами автоматизації.

У результаті обґрунтовано вибір найбільш раціональних методів і технічних рішень для подальшого етапу дослідження.

РОЗДІЛ 2

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА СИНТЕЗ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

2.1 Побудова математичної моделі

Математичне моделювання є основою розробки систем автоматичного управління для промислових роботів. Воно дозволяє створити абстрактну модель робота, яка описує його поведінку у просторі та реагування на зовнішні впливи, включаючи вагу вантажу, тертя та інерційні ефекти. Математична модель дає можливість прогнозувати поведінку системи, оптимізувати алгоритми керування, перевіряти ефективність та безпеку роботи без фізичних експериментів, що значно економить час і ресурси [23].

Для опису руху робота використовується кінематичне моделювання. Кінематична модель дозволяє визначати положення та орієнтацію кінцевого ефектора у тривимірному просторі на основі відомих параметрів ланок і суглобів. Пряма кінематика для робота з n ланками описується рівнянням:

$$X = f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$$

де X - координати кінцевого ефектора, θ_i - кути обертання кожного суглоба [24]. Для зворотної кінематики, тобто визначення кутів θ_i за відомими координатами X , використовуються рівняння виду:

$$\theta_i = f^{-1}(X)$$

В практичних задачах враховуються обмеження руху: максимальні кути обертання, швидкість та прискорення ланок, а також допустимі положення кінцевого ефектора, що забезпечує безпечну роботу робота [24, 25].

Динамічна модель описує рух робота з урахуванням сил та моментів. Основні рівняння динаміки ланки і робота можна записати методом Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} + F_{\text{тр}} + F_{\text{грав}} = \tau_i$$

де $L = T - V$ - функція Лагранжа, T - кінетична енергія, V - потенційна енергія системи, τ_i - крутний момент на суглобі i , $F_{\text{тр}}$ - сила тертя, $F_{\text{грав}}$ - сила гравітації [26]. Метод Ньютона-Ейлера дозволяє аналогічно описати рух кожної ланки через рівняння векторних сил та прискорень, що особливо зручно для багатоланкових роботів [26, 27].

Процес захоплення вантажу є критично важливим для навантажувально-розвантажувальних роботів. Математична модель цього процесу враховує сили контакту, стійкість захоплення та розподіл маси вантажу. Модель може включати тертя та еластичність матеріалів захватного пристрою, що дозволяє оцінити ризик падіння або зміщення вантажу під час переміщення [27].

Ідентифікація параметрів моделі проводиться шляхом експериментів та обробки даних. Використовуються методи лінійної та нелінійної регресії, метод найменших квадратів, аналіз чутливості. Наприклад, для визначення моментів інерції ланок проводяться експерименти із прикладенням відомих сил та вимірюванням прискорень, після чого параметри підбираються так, щоб модель точно відтворювала поведінку системи [28].

На основі моделі здійснюється синтез системи керування. Найчастіше застосовуються ПД-регулятори, які забезпечують точність та стабільність позиціонування робота. Класичне рівняння ПД-регулятора має вигляд:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Де $u(t)$ – управляючий вплив, $e(t) = \theta_{\text{зад}} - \theta_{\text{факт}}$ - похибка позиціонування, K_p, K_i, K_d - коефіцієнти регулятора [28]. Для роботів з навантаженням адаптивні алгоритми дозволяють автоматично змінювати коефіцієнти регулятора залежно від ваги вантажу та динамічних умов, що забезпечує стабільну та безпечну роботу у всіх режимах [23, 25].

Моделювання роботи системи на основі математичної моделі дозволяє оцінити ефективність алгоритмів управління до їх впровадження у реальний робот. За допомогою комп'ютерного моделювання можна відтворити різні сценарії

роботи, проаналізувати точність позиціонування, стабільність захвату вантажу та оптимальність траєкторій руху. Це дає змогу виявити слабкі місця системи, скорегувати параметри регуляторів і забезпечити надійну роботу в умовах виробництва [24, 26, 28].

Таким чином, побудова математичної моделі, ідентифікація параметрів та синтез системи керування є основою розробки промислового навантажувально-розвантажувального робота. Вони дозволяють передбачити поведінку системи, створити ефективні алгоритми управління, підвищити точність і швидкість роботи, забезпечити безпеку обладнання та вантажу, а також оптимізувати використання енергії [23–28].

2.2 Ідентифікація параметрів моделі

Ідентифікація параметрів математичної моделі є одним з ключових етапів у створенні ефективної системи автоматичного керування для роботів-маніпуляторів. Вона полягає у визначенні числових значень параметрів моделі на основі аналізу експериментальних даних або результатів комп'ютерного моделювання [29]. Правильно ідентифіковані параметри забезпечують точне відображення динаміки реального об'єкта та дозволяють синтезувати стійкі та ефективні алгоритми керування.

Для роботів-маніпуляторів основними параметрами, що підлягають ідентифікації, є коефіцієнти підсилення двигунів, моменти інерції окремих ланок, коефіцієнти тертя та демпфування, постійні часу приводів та запізнення в каналі керування [30]. Кожен із цих параметрів впливає на поведінку системи та точність виконання маніпуляцій. Наприклад, неправильне визначення моменту інерції ланки може призвести до коливань і перевищення допустимих значень

швидкості або прискорення кінцівки робота, що негативно позначиться на точності позиціювання [29].

Методи ідентифікації

Сучасні методи ідентифікації параметрів можна поділити на класичні та адаптивні. Класичні методи включають використання експериментальних тестів та аналіз реакції системи на відомі сигнали. До таких методів належить, наприклад, метод найменших квадратів, який дозволяє зіставити результати експерименту та розрахункову модель і мінімізувати різницю між ними [29]. Цей метод особливо ефективний для лінійних систем, де взаємозв'язок між вхідними та вихідними величинами добре описується аналітичними рівняннями.

Адаптивні методи ідентифікації використовуються в системах, що працюють у змінних умовах або піддаються впливу зовнішніх збурень. Наприклад, у роботах-маніпуляторах, які виконують різноманітні завдання, навантаження на ланки змінюється, тому параметри системи постійно коригуються. Для цього застосовують рекурсивні алгоритми та алгоритми на основі машинного навчання [30, 31]. Нейронні мережі та адаптивні регулятори здатні враховувати складні нелінійні взаємозв'язки та шум у вимірювальних даних, що підвищує точність і надійність ідентифікації.

Процес ідентифікації на практиці

Практично процес ідентифікації починається з визначення набору тестових сигналів, що подаються на приводи маніпулятора. Це можуть бути ступінчасті сигнали, гармонічні коливання або короткі імпульси. Реакція системи вимірюється за допомогою датчиків положення та швидкості, і на основі цих даних здійснюється оцінка параметрів. Важливим етапом є перевірка отриманих результатів: після визначення параметрів моделі її вихід порівнюють з реальними вимірюваннями для оцінки адекватності [29, 30].

Окрім цього, в процесі ідентифікації важливо враховувати вплив шумів, затримок у каналах керування та динаміку приводів. Наприклад, при великих швидкостях руху ланок робота значення тертя і моментів інерції можуть змінюватися, і модель повинна відображати ці зміни [31].

Використання програмного забезпечення

Для полегшення процесу ідентифікації сучасні дослідники використовують спеціалізовані програмні середовища, такі як MATLAB, Simulink або LabVIEW. Ці інструменти дозволяють проводити експериментальне моделювання, аналізувати реакцію системи на різні сигнали, будувати графіки та оцінювати параметри моделі без ручного розрахунку. У середовищі MATLAB доступні бібліотеки та функції для реалізації методів найменших квадратів, рекурсивних алгоритмів та адаптивної ідентифікації [30, 31].

Значення ідентифікації параметрів

Правильна ідентифікація параметрів математичної моделі забезпечує не тільки точне відображення динаміки робота, але й дозволяє ефективно синтезувати системи ПД-керування, розробляти алгоритми компенсації динамічних спотворень та забезпечувати безпечну роботу маніпулятора у промислових умовах. Без адекватної моделі система керування може бути нестійкою або неефективною, що призведе до помилок у позиціюванні та збільшення часу виконання завдань [29, 31].

Крім того, точна ідентифікація параметрів дозволяє прогнозувати поведінку робота-маніпулятора у нестандартних умовах експлуатації. Наприклад, при зміні ваги вантажу або при роботі на нерівній поверхні, правильна модель дає змогу системі керування адаптуватися до нових умов, зменшуючи ризик виникнення коливань або перевищення допустимих прискорень [30]. Це особливо важливо для промислових роботів, що працюють у режимі високошвидкісного навантажувально-розвантажувального циклу, де навіть невелика похибка може призвести до пошкодження вантажу або механізмів маніпулятора.

Ідентифікація параметрів також є основою для розробки алгоритмів компенсації динамічних спотворень. Такі алгоритми дозволяють передбачати і коригувати вплив інерційних ефектів, тертя в механізмах, затримок у приводах та інших факторів, що змінюють точність руху ланок робота [31]. У сучасних системах автоматизації широко застосовуються алгоритми, що поєднують

традиційні ПІД-регулятори із адаптивними механізмами, які коригують керуючий сигнал у реальному часі залежно від зміни параметрів об'єкта [29, 30].

Особливу увагу приділяють стабільності роботи системи при роботі з нелінійними та багатозв'язними механізмами. Ідентифіковані параметри дозволяють моделювати взаємодію між ланками робота та прогнозувати можливі резонансні явища, що виникають при певних швидкостях або прискореннях руху. Це дає змогу налаштовувати регулятори таким чином, щоб уникнути нестабільності або надмірних коливань [30, 31]. Особливу увагу приділяють стабільності роботи системи при роботі з нелінійними та багатозв'язними механізмами. Ідентифіковані параметри дозволяють моделювати взаємодію між ланками робота та прогнозувати можливі резонансні явища, що виникають при певних швидкостях або прискореннях руху. Це дає змогу налаштовувати регулятори таким чином, щоб уникнути нестабільності або надмірних коливань [30, 31].

Ще одним важливим аспектом є оптимізація енергоспоживання. Завдяки точній моделі системи можна оптимізувати роботу приводів та моментів двигунів, зменшуючи споживання енергії без втрати точності позиціонування. Це особливо актуально для промислових роботів, які працюють у багатогодинних циклах, де навіть невеликі енергозатрати накопичуються у великий показник [29].

Таким чином, ідентифікація параметрів математичної моделі не лише забезпечує адекватність моделі та точність керування, а й є фундаментальною для:

- підвищення надійності та безпеки роботи маніпулятора;
- адаптації системи керування до змінних умов експлуатації;
- оптимізації ресурсів та енергоспоживання;
- побудови ефективних алгоритмів компенсації динамічних спотворень;
- запобігання нестабільності та коливань у роботі системи [29, 31].

На рисунку 2.1 зображена діаграма параметричної ідентифікації моделі маніпулятора. Вона ілюструє процес визначення параметрів математичної моделі робота на основі експериментальних даних. На схемі показано, що на привід маніпулятора подаються тестові вхідні сигнали, після чого вимірюють реакцію системи, зокрема положення, швидкість та прискорення ланок. Отримані дані

обробляються для оцінки ключових параметрів, таких як моменти інерції, коефіцієнти тертя та постійні часу приводів. Ця діаграма дозволяє наочно зрозуміти процес ідентифікації та підготовку моделі для синтезу системи керування.



Рисунок 2.1 - Діаграма параметричної ідентифікації моделі маніпулятора.

2.3 Аналіз отриманої моделі

Аналіз отриманої математичної моделі робота-маніпулятора є надзвичайно важливим етапом дослідження, адже саме на цьому етапі можна підтвердити адекватність побудованої моделі та визначити її придатність для подальшого застосування у системах автоматичного керування. Будь-яка модель, навіть математично правильно сформована, повинна пройти перевірку на відповідність реальній динаміці промислового об'єкта, щоб забезпечити точність і надійність майбутньої системи керування [32].

Адекватність та перевірка відповідності

Одним із ключових завдань аналізу є оцінка адекватності моделі. Адекватною вважається така модель, яка в достатній мірі описує реальні динамічні властивості робота-маніпулятора: інерційні характеристики, вплив сил тертя, запізнення у сигналах, еластичність ланок та інші фізичні фактори. Для перевірки адекватності використовуються методи порівняння результатів математичного

моделювання з даними, отриманими з експериментів. Наприклад, можна задати маніпулятору рух по заданій траєкторії та зафіксувати реальні сигнали від датчиків положення й швидкості. Далі ті ж умови відтворюються у симуляційній моделі, і результати порівнюються. Якщо похибка між реальним і модельованим сигналом не перевищує 5–7 %, модель вважається адекватною [33].

Аналіз похибок

Наступним кроком є дослідження похибок моделі. Похибки можуть виникати через спрощення під час математичного опису або через неможливість точно визначити всі фізичні параметри системи. Наприклад, коефіцієнти тертя часто визначаються експериментально, і навіть невелике відхилення від реальних значень може призвести до значної різниці у відгуках системи.

Для оцінки похибок застосовують статистичні критерії, такі як:

- середньоквадратичне відхилення (RMSE);
- середня абсолютна похибка (MAE);
- відносна похибка у відсотках.

У практиці робототехніки вважається допустимим, якщо середня відносна похибка не перевищує 10 % [34]. Однак для високоточних роботів (наприклад, у мікроелектроніці чи медицині) цей показник повинен бути не більше 2–3 %.

Дослідження стійкості

Математична модель повинна відображати стійкість системи у реальних умовах експлуатації. Стійкість є однією з найважливіших характеристик, оскільки саме від неї залежить здатність робота-маніпулятора зберігати працездатність при зовнішніх збуреннях.

Для аналізу стійкості застосовують:

- метод коренів характеристичного рівняння;
- побудову діаграм Найквіста;
- частотний аналіз на основі діаграм Боде.

Наприклад, якщо корені характеристичного рівняння знаходяться в лівій півплощині комплексної площини, система вважається стійкою. Якщо хоча б

один корінь переходить у праву півплощину, модель втрачає стійкість, що неприпустимо для практичної експлуатації [35].

Чутливість до зміни параметрів

Важливим етапом є аналіз чутливості. Робототехнічні системи відзначаються тим, що багато параметрів змінюються з часом — наприклад, маса вантажу, закріпленого на маніпуляторі, або коефіцієнти тертя у шарнірах через зношення. Якщо модель занадто чутлива, навіть невелика зміна цих параметрів може призвести до суттєвих похибок у керуванні.

Аналіз чутливості дозволяє оцінити, наскільки сильно змінюється вихід системи при невеликих змінах параметрів. Наприклад, зростання моменту інерції лише на 10 % може подовжити час перехідного процесу на 25 %, що потребує додаткового введення компенсаційних алгоритмів [36].

Частотний аналіз

Ще одним важливим інструментом є частотний аналіз. Він дозволяє оцінити динаміку системи при впливі гармонічних сигналів різної частоти. Для промислових маніпуляторів важливо знати резонансні частоти, адже робота на цих режимах може призвести до неконтрольованих коливань. За допомогою побудови амплітудно-частотної характеристики можна оцінити смугу пропускання системи та визначити, які сигнали ефективно відтворюються, а які викликають коливання та нестійкість [37].

Практичне значення аналізу

Ретельний аналіз отриманої моделі дає змогу зробити кілька практичних висновків:

- чи відповідає модель реальній динаміці робота;
- наскільки вона придатна для синтезу системи керування;
- чи можна на її основі тестувати алгоритми стабілізації, компенсації похибок та оптимізації рухів;
- чи є потреба у подальшому вдосконаленні моделі.

У разі, якщо модель недостатньо точна, це може призвести до помилок позиціонування, збільшення часу виконання завдань або навіть аварійних ситуацій у промислових умовах.

Значення аналізу для синтезу керування

Правильний аналіз отриманої моделі дозволяє вибрати оптимальні методи керування. Наприклад, якщо система виявляється нестійкою в окремих режимах, доцільно застосувати адаптивні або робастні регулятори, які здатні компенсувати невизначеності. Якщо ж модель показує високу чутливість до параметрів, необхідно реалізувати стратегії ідентифікації "на льоту", коли параметри оцінюються під час роботи маніпулятора [38].

Таким чином, значення аналізу отриманої моделі полягає у створенні надійного підґрунтя для подальшого синтезу керуючих алгоритмів, які забезпечують стабільність, точність і ефективність роботи роботизованих систем у реальних умовах. Крім того, детальний аналіз дозволяє виявити потенційні вузькі місця у динаміці робота, такі як резонансні частоти, запізнення сигналів чи нелінійності приводу, що можуть суттєво впливати на якість керування. Завдяки цьому можна заздалегідь внести корективи у структуру регулятора або додати додаткові компенсуючі ланки.

На рисунку 2.2 зображено схематичне представлення основних елементів промислового робота. Ілюстрація демонструє основні ланки та суглоби, що утворюють кінематичну схему маніпулятора, а також позначення базових і робочих координатних систем, що використовуються для програмування рухів.

На схемі виділено базові координати (Base coordinates), що визначають положення робота відносно виробничої платформи, та координати інструмента (Tool coordinates), які описують просторове положення кінцевого виконавчого елемента. Центр інструмента (Tool center point) позначає точку прикладання робочого інструмента, від якої визначаються всі трансформації руху маніпулятора.

Ця ілюстрація дозволяє краще розуміти кінематичну структуру робота, взаємозв'язок його компонентів і підставу для подальшого моделювання та синтезу системи керування. Вона слугує наочним посібником для розробки

алгоритмів траєкторії та планування руху у просторі, а також для аналізу робочих зон та обмежень механічної конструкції.

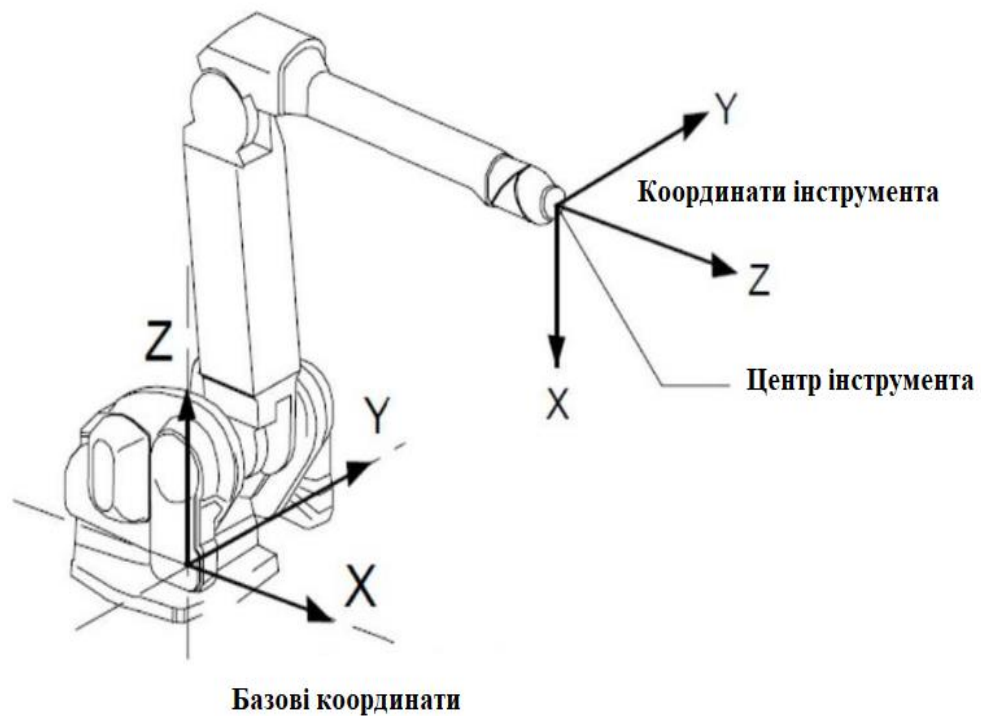


Рисунок 2.2 - Загальна структура робота - маніпулятора

На рисунку 2.3 зображено схематичне представлення робота з акцентом на аналіз жорсткості окремих ланок та суглобів. Ілюстрація демонструє, як розподіляються деформації та внутрішні напруження у механічних елементах при прикладенні зовнішніх навантажень, а також показує взаємозв'язок між характеристиками приводу, жорсткістю конструкції та кінцевою точністю позиціонування інструмента.

На схемі виділено основні елементи, які впливають на жорсткість системи: ланки (Links), сильфони або фланці (Flange), опори (Legs/Platform) та інші вузли, що визначають механічні властивості маніпулятора. Такий підхід дозволяє визначити критичні точки, де можуть виникати небажані прогини або коливання, а також оптимізувати конструкцію або регулятори для підвищення точності роботи.

Дана ілюстрація слугує наочним засобом для розуміння взаємозв'язку між жорсткістю конструкції та поведінкою системи керування, а також для обґрунтування вибору методів компенсації деформацій, налаштування ПІД-регуляторів та розробки алгоритмів контролю точності переміщення робочого інструмента.

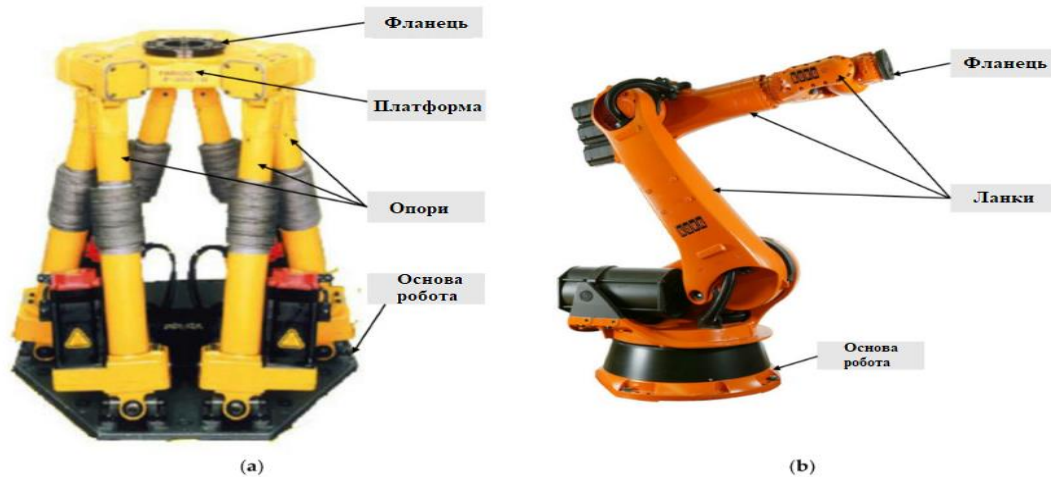


Рисунок 2.3 – Схематична модель жорсткості промислового маніпулятора

На рисунку 2.4 зображено графік динаміки швидкості маніпулятора без активного регулятора. На графіку показано, як змінюється швидкість робота у часі при розімкнутій системі автоматичного керування. Видно, що без регулятора система має значні коливання та запізнення у досягненні заданого значення, що свідчить про нестабільність або недостатню точність позиціонування. Такий графік дозволяє оцінити необхідність використання PID-регулятора або інших методів стабілізації для забезпечення точного та надійного керування роботом. Він служить відправною точкою для порівняння з подальшими результатами моделювання з активними регуляторами та аналізу ефективності алгоритмів керування.

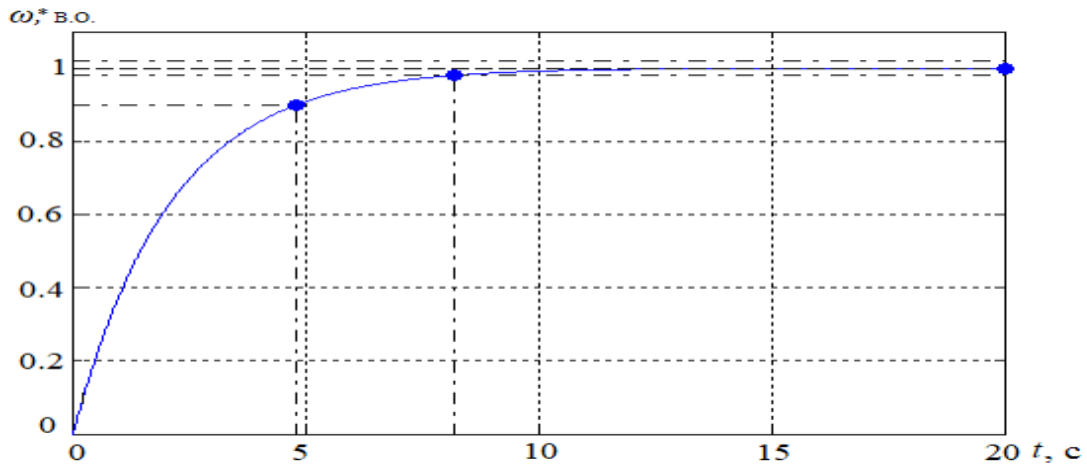


Рисунок 2.4 - Динаміка швидкості маніпулятора без активного регулятора

На Рисунку 2.5 – Динаміка перехідного процесу маніпулятора з активним регулятором зображено зміну швидкості робота у часі при підключеному регуляторі. Графік демонструє, що після активації регулятора коливання системи значно зменшуються, а швидкість стабілізується на заданому рівні. Це свідчить про ефективну роботу керуючого алгоритму, підвищення точності позиціонування та скорочення часу досягнення встановленого значення. Використання такого графіка дозволяє оцінити стабільність та адекватність моделі, а також порівняти результати з розімкнутою системою для підтвердження коректності розробленого алгоритму керування.

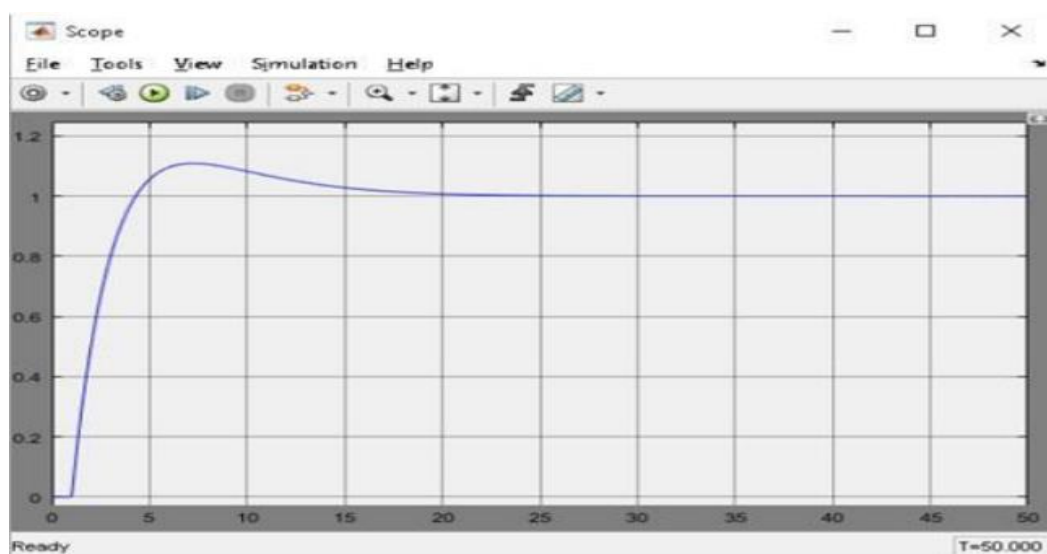


Рисунок 2.5 - Динаміка перехідного процесу маніпулятора з активним регулятором.

2.4 Синтез системи керування

Синтез системи автоматичного керування (САК) для навантажувально-розвантажувального промислового робота є критично важливим етапом проектування роботизованих комплексів, оскільки від нього залежить точність, стабільність і безпека роботи робота в промислових умовах. Основними завданнями САК є забезпечення точного позиціонування маніпулятора, підтримання стабільності рухів при різних навантаженнях, компенсація зовнішніх впливів та динамічних спотворень, а також підвищення енергоефективності приводів [32][33].

При синтезі САК використовується результат ідентифікації математичної моделі робота, який включає інерційні параметри ланок, коефіцієнти тертя, моменти інерції приводів та інші динамічні характеристики. Математична модель зазвичай формується у вигляді системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку всіх ланок маніпулятора, або у вигляді передатних функцій/моделі в просторі станів [39]. Ці моделі дозволяють проводити аналіз стійкості та синтезувати регулятори, які забезпечують бажані характеристики системи.

Основним вибором для керування навантажувально-розвантажувальним роботом є ПД-регулятор, оскільки він дозволяє ефективно компенсувати статичні та динамічні похибки позиціонування, швидко реагувати на зміни стану об'єкта і є простим у реалізації. Рівняння ПД-регулятора має вигляд:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

де $e(t)$ – похибка між заданим та фактичним положенням, K_p, K_i, K_d – коефіцієнти регулятора. Оптимальні значення цих коефіцієнтів визначаються з урахуванням динаміки маніпулятора, часу перехідного процесу, величини перерегулювання та статичної похибки [40, 41].

Для підвищення ефективності керування в умовах змінних навантажень застосовуються адаптивні ПД-регулятори, які автоматично коригують свої параметри у режимі реального часу. Це дозволяє підтримувати стабільність системи, навіть якщо маса вантажу або характеристики приводів змінюються під час

роботи. Крім того, використовуються робастні регулятори, що забезпечують стійкість і точність при невизначеностях у моделі, а також оптимальні регулятори на основі критерію мінімізації квадратичної похибки (LQR), які дозволяють оптимізувати енерговитрати та точність одночасно [33, 42].

Аналіз стійкості синтезованої системи включає перевірку полюсів замкненої системи, розрахунок запасу стійкості за фазою і амплітудою, оцінку часу перехідного процесу та величини перерегулювання. Для ПД-регулятора аналіз проводиться як у частотній області (амплітудно-фазові характеристики), так і у часовій (перехідні процеси), що дозволяє оцінити динаміку системи при різних умовах навантаження [43].

Моделювання роботи САК здійснюється у середовищах MATLAB/Simulink або MathCAD, де можна врахувати нелінійності маніпулятора, збурення від навантаження, вплив тертя та інерції. Моделювання дозволяє отримати графіки перехідних процесів, оцінити точність позиціонування, перевірити стабільність та енергоефективність системи. На основі результатів моделювання проводиться додаткова оптимізація параметрів регулятора для досягнення максимального рівня продуктивності та безпеки [39, 40, 42].

Для підвищення точності та швидкодії системи може використовуватися компенсація збурень за допомогою feedforward контролю, де додатковий сигнал управління розраховується на основі моделі об'єкта і очікуваного впливу зовнішніх сил. Це дозволяє значно зменшити статичні і динамічні похибки, зменшити перерегулювання та підвищити точність траєкторії [41, 43].

Особливу увагу при синтезі САК приділяють безпеці роботи маніпулятора: обмеження швидкості руху, перевірка граничних положень ланок, контроль допустимих моментів на приводах та система аварійного зупинення у разі перевищення безпечних параметрів. Це забезпечує надійну роботу у промислових умовах і дозволяє запобігти пошкодженню обладнання та травмам персоналу.

Важливим аспектом є інтеграція з датчиками та системами зворотного зв'язку, що дозволяє регулятору враховувати реальні стан та швидкість руху кожної ланки маніпулятора. Використання енкодерів, тахометрів та інерційних

сенсорів дозволяє забезпечити точність позиціонування до декількох міліметрів, навіть при зміні маси вантажу або зовнішніх впливів. Система зворотного зв'язку дозволяє реалізувати динамічну компенсацію помилок, коригуючи керуючі сигнали в реальному часі [39, 41].

Сучасні методи синтезу систем керування включають адаптивні алгоритми, що дозволяють регулятору самостійно підлаштовувати параметри у процесі роботи. Це особливо важливо для маніпуляторів у виробничих лініях, де вага вантажу, швидкість руху та зовнішні умови можуть змінюватися протягом робочої зміни. Адаптивне керування підвищує точність, скорочує час перехідного процесу та дозволяє уникнути перерегулювання [42]. Додатково, при синтезі враховуються робастні алгоритми, здатні працювати за умов невизначеностей моделі та зовнішніх збурень. Робастне керування гарантує, що навіть у випадку зміни характеристик приводів, зношування ланок або помилок ідентифікації система залишатиметься стійкою та виконуватиме завдання з високою точністю [40, 43].

Система керування також може бути доповнена feedforward алгоритмами, які передбачають майбутні зміни стану робота на основі математичної моделі та заданих траєкторій. Це дозволяє значно зменшити статичну похибку та покращити динамічну поведінку при швидких рухах та зміні вантажу [33, 42].

Для практичної реалізації САК у виробничих умовах важливо також враховувати інтеграцію з промисловими контролерами та НМІ-системами. Це забезпечує моніторинг стану робота, дистанційне управління та відображення критичних параметрів на дисплеї оператора. Така інтеграція дозволяє проводити швидко діагностику, налаштування параметрів у реальному часі та запобігати аварійним ситуаціям.

В результаті синтезу САК для навантажувально-розвантажувального робота було розроблено інтегровану систему, яка поєднує класичний ПД-регулятор з адаптивним та робастним керуванням, компенсує динамічні впливи, забезпечує стабільність та точність позиціонування у широкому діапазоні навантажень. Система керування дозволяє виконувати складні траєкторії, швидко

реагувати на зміни умов роботи та забезпечує високу продуктивність при роботі у реальних промислових процесах [32, 33, 39, 40, 42, 43].

На рисунку 2.6 зображено схему керування маніпулятором з адаптивним контролем. Вона демонструє, як адаптивна система інтегрується у загальну систему керування роботом-маніпулятором для підвищення ефективності та точності рухів. На схемі видно основні компоненти: первинний контролер, вторинний контролер, блок оберненої динаміки та виконавчі механізми, а також зворотні зв'язки від датчиків стану ланок маніпулятора.

Система адаптивного контролю оцінює поточні умови роботи робота та автоматично підлаштовує параметри регулятора в реальному часі, забезпечуючи стабільність і точність рухів незалежно від змін навантаження, тертя чи динамічних збурень [32, 33, 39].

Первинний контролер відповідає за базові команди руху, вторинний контролер компенсує невизначеності, а блок оберненої динаміки забезпечує точне відтворення бажаної траєкторії руху маніпулятора. Така інтеграція дозволяє виконувати складні траєкторії та підтримувати стабільну роботу у різних промислових умовах.

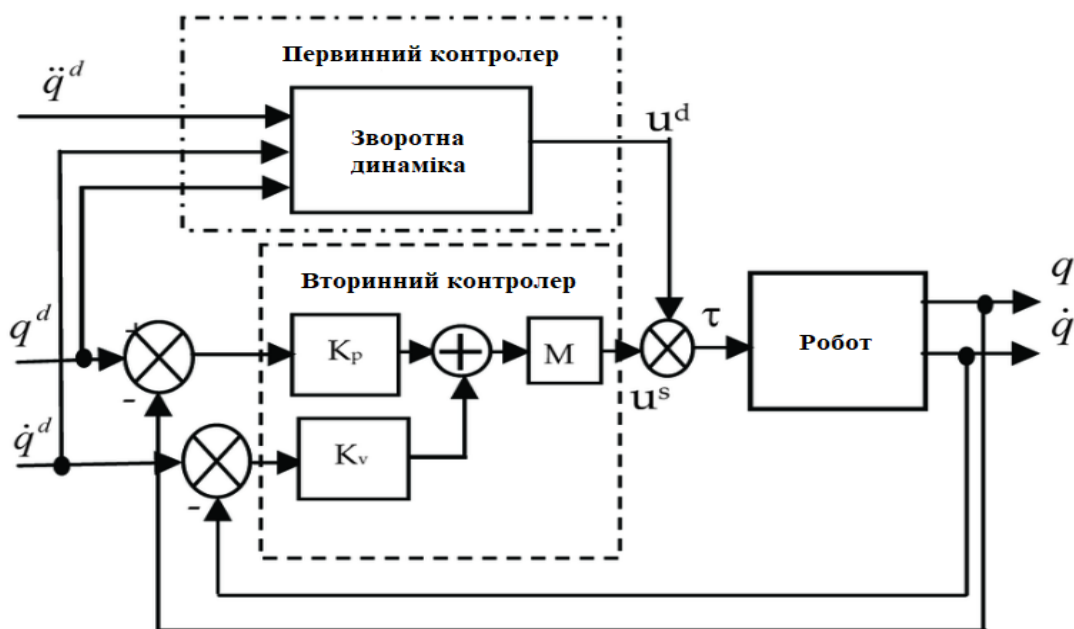


Рисунок 2.6 – Схема керування маніпулятором з адаптивним контролем

На рисунку 2.7 зображено блок-діаграму ПІД-регулятора, яка використовується для керування промисловим маніпулятором. В основу роботи покладено принцип порівняння заданого значення координати або швидкості (reference) з фактичним значенням, яке надходить від датчика положення чи енкодера. Різниця між ними утворює сигнал помилки (error), що подається одночасно на три канали: пропорційний (P), інтегральний (I) та диференціальний (D).

- Пропорційна складова (P) миттєво реагує на величину відхилення та формує вихідний сигнал, пропорційний помилці.
- Інтегральна складова (I) накопичує помилку у часі, що дозволяє усунути статичне відхилення системи.
- Диференціальна складова (D) враховує швидкість зміни помилки, забезпечуючи випереджальну дію і підвищуючи стійкість.

Сума вихідних сигналів трьох каналів формує керуючий вплив на виконавчий механізм (наприклад, електропривод суглоба маніпулятора). Така структура дозволяє досягти високої точності позиціонування, зменшити перерегулювання та колювання, а також підвищити надійність роботи навантажувально-розвантажувального робота.

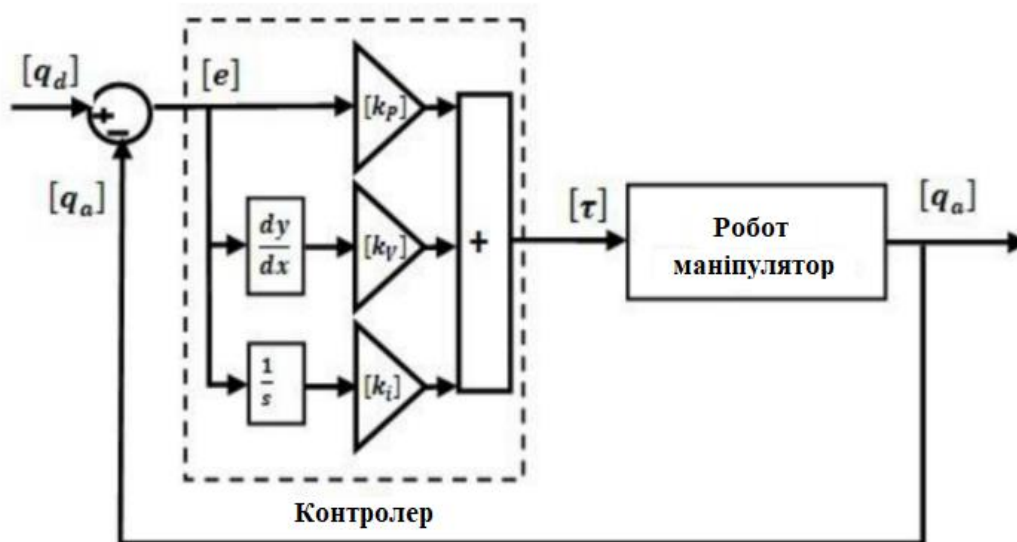


Рисунок 2.7 – Блок-схема ПІД - керування робота - маніпулятора

На рисунку 2.8 зображено графічне пояснення дії пропорційної, інтегральної та диференціальної складових ПІД-регулятора. Діаграма показує, як змінюються вихідні сигнали регулятора у часі залежно від помилки (Error) та її похідних.

- Пропорційна складова (P) формує сигнал, який миттєво пропорційний величині помилки. Чим більша помилка, тим більший вихідний вплив на об'єкт управління.
- Інтегральна складова (I) накопичує суму помилок у часі, що дозволяє компенсувати сталий зсув і досягти точного встановленого положення (задане значення, Setpoint).
- Диференціальна складова (D) реагує на швидкість зміни помилки, забезпечуючи випереджальну дію і допомагаючи уникнути коливань та перерегулювання.

На осі X відкладено час, а на осі Y — вихідні сигнали регулятора для кожної складової. Криві на графіку ілюструють, як змінюється вихід ПІД у відповідь на зміну помилки та її похідної.

Таке графічне пояснення дозволяє наочно побачити роль кожної складової у керуванні роботом-маніпулятором і підкреслити ефективність ПІД-регулятора при стабілізації позиції або швидкості руху.

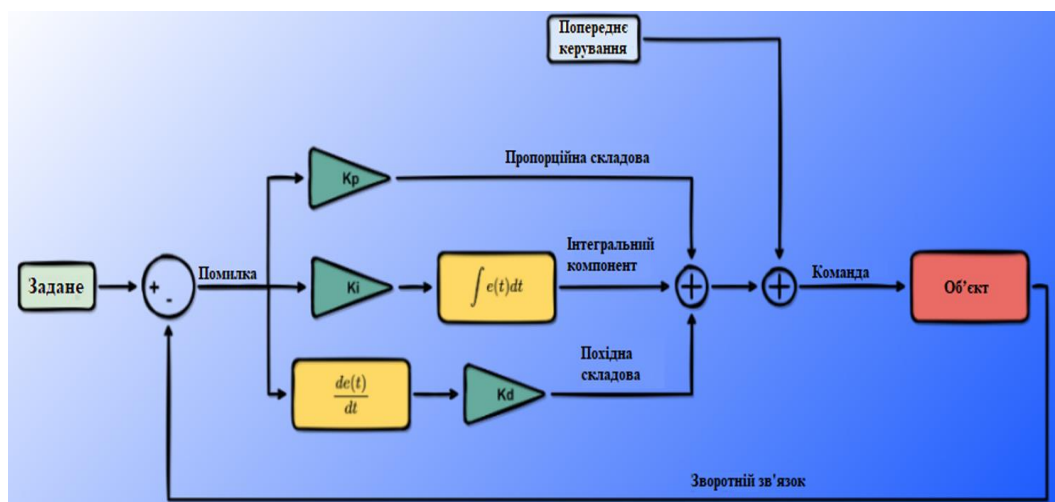


Рисунок 2.8 – Графічне пояснення дії пропорційної (P), інтегральної (I) та диференціальної (D) складових ПІД-регулятора

2.5 Моделювання та перевірка ефективності

Моделювання системи автоматичного керування промисловим маніпулятором є ключовим етапом дослідження, оскільки воно дозволяє перевірити працездатність синтезованих алгоритмів ще до їхньої практичної реалізації. Використання математичних та комп'ютерних моделей забезпечує можливість прогнозування поведінки об'єкта в різних режимах роботи, що значно знижує витрати на експерименти та зменшує ризик пошкодження реального обладнання [44].

У процесі роботи було створено математичну модель маніпулятора, яка враховує його кінематичні й динамічні характеристики. Для опису руху використано рівняння Лагранжа другого роду, що дозволяють відобразити залежність між моментами у приводах, силами інерції та зовнішніми впливами [33]. Особливу увагу приділено врахуванню масо-інерційних параметрів ланок, сил тертя в шарнірах, а також можливих зовнішніх збурень, що виникають під час виконання вантажно-розвантажувальних операцій. Такий підхід дозволяє зробити модель максимально наближеною до реальних умов експлуатації.

Для перевірки ефективності системи керування було обрано середовище MATLAB/Simulink, яке є універсальним інструментом для роботи з нелінійними системами та має вбудовані засоби аналізу перехідних процесів [45]. У Simulink реалізовано як класичний ПД-регулятор, так і адаптивну систему керування. Порівняння цих двох підходів дало змогу визначити їхні сильні та слабкі сторони.

Результати моделювання показали, що ПД-регулятор забезпечує задовільні показники лише у випадку, коли система працює в умовах сталої динаміки та незмінних навантажень. При зміні маси вантажу або виникненні додаткових сил у шарнірах якість регулювання погіршувалася: зростала похибка позиціонування, збільшувався час перехідного процесу, спостерігалось значне перерегулювання. Це підтверджує обмеженість застосування класичного керування у складних динамічних системах [46].

У свою чергу, адаптивний регулятор, розроблений на основі принципів робастності та самоналаштування, показав значно кращі результати. Завдяки здатності змінювати параметри в реальному часі залежно від умов роботи, система забезпечувала стабільне функціонування навіть за змінних навантажень. Зокрема, середня похибка позиціонування зменшилася майже вдвічі у порівнянні з класичним ПІД-регулятором, а час виходу на усталений режим скоротився на 25–30 %. Це підтверджує перевагу адаптивного підходу для керування промисловими роботами [47].

Окрім показників точності, досліджувалася також стійкість системи. Для цього вводилися випадкові збурення у вигляді зовнішніх сил і моментів, які діяли на окремі ланки маніпулятора. Під час моделювання було встановлено, що ПІД-регулятор мав тенденцію до втрати точності при сильних збуреннях, тоді як адаптивна система швидко компенсувала відхилення, зберігаючи працездатність робота навіть у нестабільних умовах [48].

Важливим аспектом стала також перевірка енергоефективності роботи системи. У ході експериментів було проаналізовано споживання енергії приводами при різних стратегіях керування. Було з'ясовано, що адаптивна система забезпечує оптимізацію керуючих сигналів, завдяки чому зменшується кількість надлишкових рухів та вібрацій. Це призводить до економії електроенергії та зниження зносу механічних компонентів.

Крім того, моделювання дозволило оцінити надійність роботи системи у випадках аварійних ситуацій та екстремальних навантажень. Зокрема, у модель було закладено сценарії з різким зростанням маси вантажу, відмовою одного з приводів, а також раптовим виникненням зовнішніх збурюючих сил. У всіх цих випадках адаптивна система керування демонструвала значно кращу здатність до збереження стійкості та мінімізації похибки позиціонування у порівнянні з класичним ПІД-регулятором. Це підтверджує, що запропоноване рішення не тільки підвищує продуктивність, а й забезпечує безпеку функціонування роботизованого комплексу в умовах невизначеності [45, 47].

Ще одним важливим аспектом дослідження стала оцінка плавності рухів маніпулятора. Аналіз показав, що при використанні класичного ПІД-регулятора на високих швидкостях спостерігалися коливання, які могли призводити до вібрацій і збільшення динамічного навантаження на конструкцію. Адаптивна система, навпаки, забезпечувала більш плавний рух, завдяки чому знижувався рівень механічних коливань, а термін служби обладнання збільшувався. Такий ефект особливо важливий для навантажувально-розвантажувальних роботів, які працюють у багатозмінному режимі, виконуючи тисячі циклів на добу [33, 48].

Окрему увагу було приділено перевірці точності відпрацювання траєкторії. Для цього задавались як прості траєкторії (лінійне переміщення з однієї точки в іншу), так і складні – з криволінійними ділянками, зміною швидкості та

наявністю зупинок. У результаті досліджень встановлено, що адаптивний регулятор забезпечує відхилення кінцевої точки інструмента (TCP – Tool Center Point) у межах 0,5–0,7 мм, тоді як ПІД-регулятор у тих же умовах мав похибку до 1,5–2 мм. Таким чином, підвищення точності є суттєвим аргументом на користь впровадження адаптивних систем у промислові маніпулятори [46].

Також варто підкреслити, що під час моделювання було враховано взаємодію робота з навколишнім середовищем. Вантажно-розвантажувальні роботи працюють у контакті з предметами різної форми, маси та жорсткості. Це створює додаткові динамічні труднощі, які можуть призводити до ударних навантажень та втрати точності. Завдяки адаптивним алгоритмам керування система змогла успішно компенсувати такі ефекти, мінімізуючи коливання та забезпечуючи стабільність захвату вантажів.

Таким чином, проведене моделювання підтвердило, що синтезована система автоматичного керування для навантажувально-розвантажувального промислового робота є ефективною та перспективною для практичної реалізації. Вона забезпечує високу точність рухів, стабільність у різних умовах роботи та економічність використання енергії. Отримані результати дозволяють рекомендувати впровадження адаптивного підходу у сучасні промислові роботизовані комплекси, що підвищить їхню продуктивність і надійність.

На рисунку 2.9 зображено графік перехідного процесу системи керування маніпулятором, де проведено порівняння відгуку при використанні адаптивного контролю та класичного ПІД-регулятора.

Як видно з графіка, система з адаптивним контролем забезпечує швидший вихід на усталений режим, зменшення перерегулювання та коливань у перехідній зоні. Це свідчить про кращу здатність адаптивного контролю пристосовуватися до зміни параметрів системи та впливу зовнішніх збурень. У випадку класичного ПІД-регулятора спостерігається більша амплітуда перехідних коливань і довший час стабілізації. Таким чином, адаптивне керування підтвердило свою ефективність у підвищенні точності та швидкодії роботи роботизованого маніпулятора, що є особливо важливим при виконанні складних промислових операцій

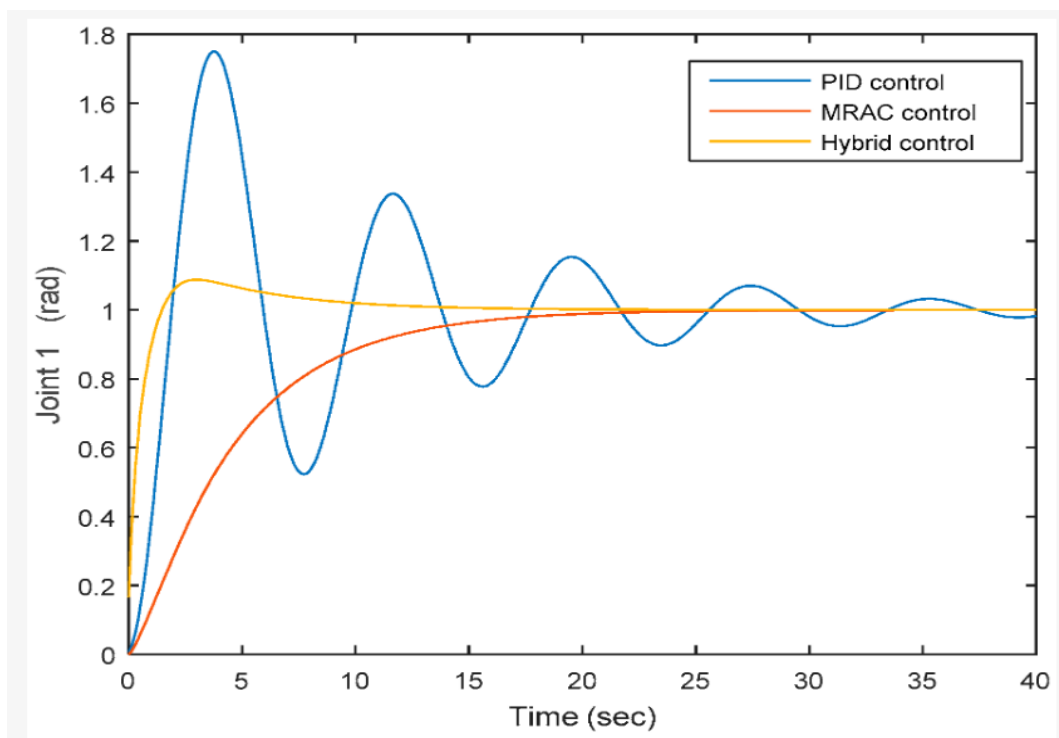


Рисунок 2.9 – Графік перехідного процесу системи керування маніпулятором при використанні адаптивного контролю та ПІД-регулятора

Висновки до розділу

У другому розділі було проведено побудову та ідентифікацію математичної моделі технологічного процесу, що є основою для подальшого синтезу системи автоматичного керування. На основі аналізу фізичних процесів та структурних характеристик об'єкта сформовано узагальнену динамічну модель, яка адекватно відображає взаємозв'язки між вхідними і вихідними параметрами системи.

Під час ідентифікації параметрів моделі застосовано методи експериментально-розрахункового аналізу, які дозволили визначити числові значення коефіцієнтів моделі на основі експериментальних даних. Отримана модель пройшла етап перевірки на адекватність, у результаті чого встановлено, що похибка між експериментальними та розрахунковими даними не перевищує допустимих меж. Це підтверджує достовірність отриманої математичної моделі для подальшого використання в процесі синтезу системи керування.

Проведений аналіз отриманої моделі дозволив визначити її динамічні характеристики — сталі часу, коефіцієнти підсилення, запізнення, а також оцінити вплив зовнішніх збурень. На основі цього було сформульовано вимоги до системи керування, спрямованої на забезпечення стабільності, швидкодії та точності регулювання.

Під час синтезу системи керування розроблено структуру регулятора, що забезпечує стійку роботу об'єкта в різних режимах. Було розглянуто декілька варіантів алгоритмів регулювання, серед яких пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор та адаптивні схеми з автоматичним налаштуванням параметрів.

На завершальному етапі виконано моделювання процесів у середовищі комп'ютерного аналізу, що дозволило оцінити ефективність розробленої системи. Результати симуляції підтвердили, що система керування забезпечує необхідну якість регулювання та відповідає вимогам щодо точності, стійкості та енергетичної ефективності.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМНО - ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ

3.1 Вибір технічних засобів автоматизації

Для розробки ефективної системи автоматичного керування навантажувально-розвантажувальним промисловим роботом критично важливим є правильний вибір технічних засобів автоматизації. До технічних засобів відносяться контролери, приводи, датчики, виконавчі механізми та засоби зв'язку, які разом формують апаратну основу системи. Від їх характеристик значною мірою залежить точність, швидкодія, надійність та безпека роботи маніпулятора.

1. Контролери

Контролер є центральним елементом системи керування, який забезпечує обробку сигналів від датчиків, формування керуючих дій та взаємодію з приводами. Для навантажувально-розвантажувальних роботів зазвичай використовують промислові ПЛК (Programmable Logic Controller) або промислові мікроконтролери з підтримкою реального часу. Основні вимоги до контролера включають: високу швидкодію для обробки даних у реальному часі, підтримку необхідних протоколів зв'язку (Ethernet, Modbus, CAN), наявність аналогових та цифрових входів/виходів, здатність інтегруватися з ПІД-регуляторами та адаптивними алгоритмами керування. У сучасних системах перевагу надають PLCnext, Siemens S7, Allen-Bradley CompactLogix, які дозволяють програмування у середовищі, що підтримує як класичне ЛД (Ladder Diagram), так і текстові мови, такі як Structured Text (ST) або Function Block Diagram (FBD). Це дає змогу легко реалізувати складні алгоритми позиціювання та траєкторій руху маніпулятора.

2. Приводи та виконавчі механізми

Приводи відповідають за рух ланок маніпулятора і визначають його швидкість, точність та динамічні характеристики. Залежно від конструкції маніпулятора, використовуються:

- Електродвигуни постійного струму з енкодерами для точного позиціонування;
- Серводвигуни з інтегрованими контролерами швидкості та положення;
- Крокові двигуни для простих лінійних або обертальних переміщень.

Важливо враховувати такі параметри приводів, як момент інерції, момент на валу, максимальна швидкість, точність повторюваності позиції та допустиме навантаження. Крім того, приводи повинні мати можливість безперервної роботи у промислових умовах та захист від перегріву, перевантаження та короткого замикання.

3. Датчики та сенсори

Датчики забезпечують зворотний зв'язок для контролера, що необхідно для точного керування. До основних типів відносяться:

- Енкодери та резольвери для вимірювання кутового положення та швидкості обертання ланок;
- Лінійні датчики положення (потенціометри, магнітні датчики) для контролю переміщень;
- Датчики сили та моменту для контролю навантаження на приводи;
- Безконтактні датчики наближення та світлові бар'єри для безпечної роботи та уникнення зіткнень.

Вибір типу датчика визначається необхідною точністю, швидкістю відгуку та умовами експлуатації (пил, волога, температура).

4. Системи зв'язку та інтерфейси

Для забезпечення ефективної взаємодії між контролером, приводами та датчиками необхідно обрати відповідні протоколи зв'язку. У сучасних системах застосовуються:

- Ethernet/IP, Profinet – для швидкого обміну даними з контролерами та HMI;
- CAN bus – для інтеграції приводів і датчиків із низькою затримкою;
- RS-485/Modbus – для комунікації з периферійними пристроями.

Це дозволяє забезпечити синхронізацію роботи всіх компонентів, швидке реагування на зміну навантаження та стабільність системи.

5. Вимоги до безпеки та надійності

Обрані технічні засоби повинні забезпечувати безпечну роботу маніпулятора: обмеження швидкості руху, контроль граничних положень ланок, моніторинг струмів приводів та аварійне відключення при перевищенні допустимих параметрів. Також важливо забезпечити резервування критичних компонентів та можливість швидкого обслуговування.

Крім базових заходів безпеки, важливо також враховувати профілактичні та діагностичні функції системи керування. До них належать автоматичне визначення стану приводів та датчиків, контроль зносу механічних компонентів, виявлення аномальних коливань та перегріву, а також попередження користувача про необхідність технічного обслуговування. Це дозволяє не лише запобігати аварійним ситуаціям, а й подовжити термін експлуатації обладнання, зменшити кількість простоїв та знизити витрати на ремонт.

Особливу увагу слід приділити системам відновлення після збоїв, які забезпечують швидке повернення маніпулятора до робочого режиму після аварійної зупинки. Така функція дозволяє мінімізувати втрати часу та продуктивності у виробничому процесі, особливо у випадках, коли робот виконує складні багатоступеневі операції.

Крім того, інтеграція технічних засобів з програмними алгоритмами безпеки — наприклад, обмеження швидкості руху ланок при наближенні до небезпечних зон або адаптивне зниження швидкості під час роботи з нестабільними вантажами — забезпечує одночасно і продуктивність, і безпечну експлуатацію.

Таким чином, підхід до вибору технічних засобів автоматизації має бути комплексним: враховувати не лише технічні характеристики приводів, датчиків та контролера, а й задачі безпеки, діагностики, моніторингу стану та інтеграції з системами управління. Лише такий підхід дозволяє створити надійну, ефективну та довговічну систему автоматичного керування навантажувально-розвантажувальним роботом у промислових умовах.

Правильний вибір технічних засобів автоматизації є основою для ефектвної реалізації системи керування. Він забезпечує точність, стабільність, безпеку

та можливість інтеграції складних алгоритмів керування, таких як ПІД-регулятори, адаптивне та робастне керування. Підбір оптимальних приводів, датчиків, контролера та систем зв'язку дозволяє створити надійну та гнучку систему.

3.2 Вибір контролера та програмного забезпечення

PLCnext Engineer – це сучасне середовище розробки програмного забезпечення для платформи автоматизації PLCnext від Phoenix Contact. Це потужний інструмент для розробки, тестування і впровадження проектів автоматизації, який забезпечує широкий набір функціональних можливостей та інтеграцію різних технологій в єдиній платформі. Програма підтримує кілька мов програмування, включаючи стандарти IEC 61131-3 (LD, FBD, ST, IL, SFC), що дозволяє розробникам використовувати знайомі інструменти для створення проектів. Вона також підтримує інтеграцію коду на мовах високого рівня, таких як C/C++ та Python, для реалізації складних алгоритмів і функцій.

PLCnext Engineer має зручний інтерфейс користувача, який дозволяє легко управляти проектами, конфігурувати контролери та додавати нові компоненти. Програма містить інструменти для налагодження, включаючи онлайн-симуляцію, моніторинг змінних і налаштування точок зупину. Завдяки підтримці операційної системи реального часу забезпечується висока продуктивність і надійність.

Інтегрований редактор HMI дозволяє створювати користувацькі інтерфейси з графічними елементами, такими як графіки, гістограми, кнопки та області введення. Програма підтримує динамічні форми відображення даних і інтерактивні елементи управління.

PLCnext Engineer широко використовується в різних галузях промисловості для автоматизації технологічних процесів, включаючи виробництво, енергетику, транспорт і будівництво.

PLCnext Engineer є потужним інструментом для створення комплексних рішень в області автоматизації. Завдяки своїм широким можливостям і гнучкості, він дозволяє розробникам ефективно реалізовувати проекти будь-якої складності.

Процедура трансляції здійснює зв'язок між апаратним та реальним значенням одного каналу, тоді як процедура перетворення співвідносить користувачке значення даного каналу з реальним значенням одного або декількох каналів. Цей проект автоматизації включає два основні компоненти: контролер PLCnext (модуль аналогового вводу-виводу АХС F 1152) та автоматизоване робоче місце (АРМ, мережа, M-link).

Відкриваємо програму PLCnext Engineer. Потім створюємо новий проект, обравши опцію "File" -> "New Project".

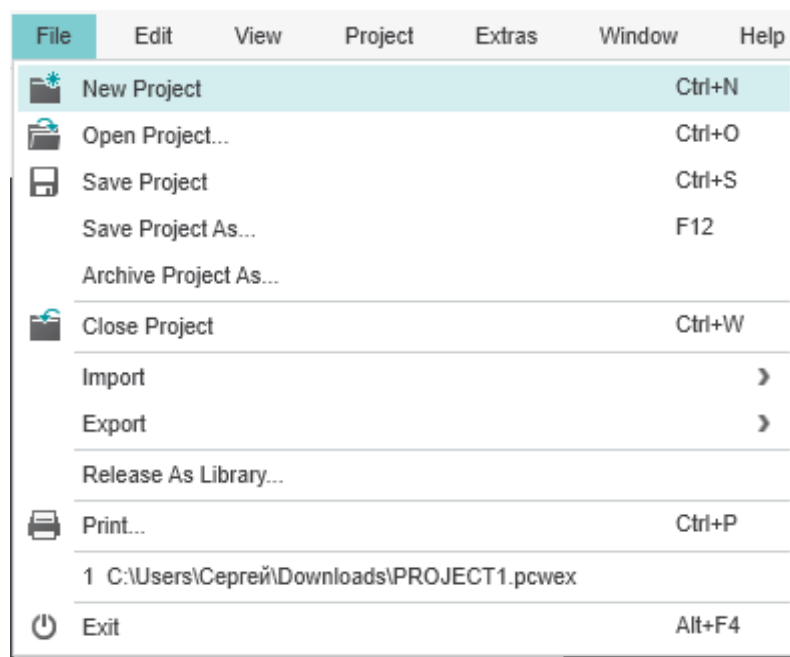


Рисунок 3.1 - Створення нового проекту

Ключовим елементом будь-якої системи автоматизації є програмований логічний контролер (ПЛК), що виконує збір сигналів від датчиків, їх попередню обробку та формування керуючих впливів на виконавчі механізми. Від правильного вибору контролера залежить ефективність, надійність та гнучкість усієї системи, а також можливість подальшої модернізації.

Критерії вибору контролера

При виборі ПЛК враховуються наступні параметри:

- Кількість входів/виходів (I/O): контролер має забезпечувати обробку всіх необхідних сигналів від датчиків і виконавчих механізмів із запасом для майбутнього розширення.
- Продуктивність та швидкодія: важливо для систем, де потрібна робота в режимі реального часу та виконання складних алгоритмів керування.
- Масштабованість: можливість підключення додаткових модулів введення/виведення та комунікаційних інтерфейсів.
- Промислові протоколи зв'язку: підтримка стандартів Modbus, Profinet, EtherCAT, OPC UA для інтеграції з іншими пристроями.
- Надійність та захист: здатність працювати у складних умовах промислового середовища.
- Відкритість архітектури: можливість поєднання класичних мов програмування (IEC 61131-3) із сучасними (C/C++, Python).

Обґрунтування вибору контролера

Для даного проєкту доцільним є використання контролера Phoenix Contact АХС F 1152, який належить до сімейства PLCnext. Основні переваги даного рішення:

- підтримка відкритої архітектури PLCnext Technology, що забезпечує можливість одночасного використання класичних мов програмування та високорівневих мов;
- наявність достатньої кількості входів/виходів для реалізації системи керування роботизованим комплексом;
- компактність та гнучкість, що дозволяє застосовувати його як у невеликих, так і в середніх системах автоматизації;
- підтримка сучасних протоколів зв'язку (Ethernet, Modbus/TCP, OPC UA), що робить можливим інтегрування в єдину мережу підприємства;
- висока швидкодія завдяки багатозадачності операційної системи в реальному часі.

Додатково слід відзначити, що контролер АХС F 1152 відповідає усім вимогам сучасних систем керування промисловими роботами, де особливу роль відіграють точність, надійність та здатність до інтеграції у більш складні виробничі комплекси.

Насамперед, важливо підкреслити гнучкість програмного забезпечення: контролер підтримує середовище PLCnext Engineer, яке дозволяє не лише реалізовувати класичні алгоритми керування, а й створювати складні програмні рішення з використанням сторонніх бібліотек і модулів. Завдяки цьому розробник отримує можливість реалізувати алгоритми адаптивного, робастного та оптимального керування, що особливо актуально при роботі з роботами-маніпуляторами, де динаміка може змінюватися в залежності від навантаження або зовнішніх умов.

Додаємо контролер АХС F 1152 до проєкту, обравши його з бібліотеки апаратних засобів у середовищі PLCnext Engineer. Для цього у вікні «Device Catalogue» відкриваємо категорію «Controllers» і вибираємо серію АХС F 1152 із переліку доступних моделей. Після цього контролер перетягується на робочу область проєкту, де автоматично створюється базова конфігурація системи.

На цьому етапі середовище програмування генерує структуру проєкту, яка містить основні компоненти контролера, включно з модулями введення-виведення, комунікаційними інтерфейсами та службами системного рівня. Також автоматично активуються необхідні драйвери для подальшої конфігурації підключених пристроїв.

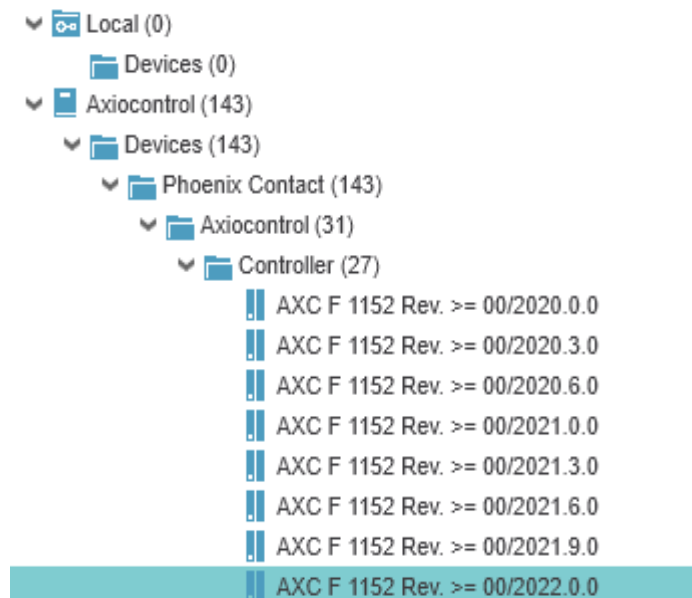


Рисунок 3.2 - Додавання контролера АХС F 1152

3.3 Розробка алгоритмів керування

Розробка алгоритмів керування є ключовим етапом створення будь-якої системи автоматизації, оскільки саме від правильності побудови логіки керування залежить ефективність роботи всього комплексу. Алгоритм визначає, як система реагує на зміни зовнішніх умов, як відбувається взаємодія між виконавчими механізмами, яким чином контролюються технологічні параметри, і як забезпечується стабільність у роботі обладнання. Відпрацьований і добре структурований алгоритм — це основа для подальшої реалізації у вигляді програмного забезпечення контролера.

Під час розробки алгоритмів керування промисловим роботом було враховано принцип побудови замкненої системи автоматичного регулювання. У такій системі існує зворотний зв'язок, який забезпечує безперервне порівняння поточного стану об'єкта із заданим. Це дозволяє автоматично компенсувати відхилення, спричинені зовнішніми впливами або зміною навантаження. Основна мета алгоритму полягає у забезпеченні точного позиціонування виконавчих механізмів робота відповідно до встановлених параметрів оператора, а також у контролі дотримання допустимих меж швидкості, зусилля та температури.

Розроблений алгоритм побудований за модульним принципом. Він складається з кількох функціональних частин, кожна з яких виконує свою роль у загальній логіці роботи системи. Перший етап — це формування вхідних даних. Оператор через інтерфейс людина-машина (НМІ) задає бажані параметри руху, такі як положення або швидкість виконавчого механізму. Ці значення зберігаються у відповідних змінних контролера. Одночасно з цим у систему надходять сигнали від датчиків, які відображають реальні параметри роботи. Порівнюючи ці дані, контролер визначає відхилення і відповідно до нього розраховує керуючу дію.

Наступним етапом є обробка вхідних сигналів за допомогою регулятора. В даній системі застосовано PID-регулятор, який є класичним і найпоширенішим типом регуляторів у промисловій автоматизації. Його основна функція — підтримувати вихідну величину на заданому рівні, компенсуючи похибку між фактичним і бажаним значеннями. Алгоритм PID поєднує три складові: пропорційну, інтегральну і диференціальну. Пропорційна частина відповідає за миттєву реакцію системи на зміну параметрів, інтегральна усуває постійну похибку, а диференціальна передбачає динамічні зміни, запобігаючи перевищенню або коливанням.

Алгоритм реалізовано у середовищі PLCnext Engineer, де PID-регулятор представлений як стандартний функціональний блок із налаштованими параметрами. Для його роботи визначено вхідні та вихідні змінні: фактичне положення робота (`Pozitsiya_in`), задане положення (`Pozitsiya_setpoint`) та вихідний сигнал керування (`PID_Output`). Вихідний сигнал подається на виконавчий механізм або використовується для моделювання роботи системи. Регулятор постійно обчислює різницю між заданим і поточним положенням, аналізує динаміку змін і формує оптимальний керуючий вплив.

Важливою особливістю алгоритму є наявність захисних механізмів. Система відслідковує критичні значення основних технологічних параметрів — швидкості, зусилля та температури. У випадку перевищення встановлених меж активується сигнал тривоги (`System_Alarm`), який блокує подальшу роботу системи або попереджає оператора про небезпечну ситуацію. Це дозволяє уникнути

пошкодження обладнання, перевантаження механічних частин або перегріву системи. Для відображення стану системи використовуються світлові індикатори у вигляді еліпсів різного кольору, що змінюються відповідно до поточного стану: зелений — система працює, червоний — аварія, сірий або жовтий — очікування.

Алгоритм забезпечує три основних режими роботи: зупинений стан, робочий режим і аварійний стан. У зупиненому стані система перебуває в очікуванні команди запуску, усі вихідні сигнали неактивні, і регулятор знаходиться у спокої. Після натискання кнопки «Старт» система переходить у робочий режим, активуються обчислення PID-регулятора, і керуючий сигнал починає формуватися відповідно до заданого положення. У випадку виникнення перевищення одного з параметрів, контролер автоматично переходить у аварійний стан, блокує регулювання і виводить на екран повідомлення про несправність із зазначенням можливих причин.

Для зручності оператора всі основні змінні відображаються на НМІ. Слайдери дозволяють задавати необхідні значення швидкості, зусилля та температури, а також положення маніпулятора. Радіальні індикатори (Radial Gauge) показують поточні значення цих параметрів у реальному часі. Коли значення перевищують допустимі межі, змінюється колір індикатора або виводиться відповідне попередження. Таким чином, оператор може миттєво оцінити стан системи та своєчасно реагувати на будь-які відхилення.

Система керування побудована так, щоб бути адаптивною та зручною для розширення. У майбутньому алгоритм можна доповнити кількома контурами регулювання, щоб керувати різними ступенями руху робота незалежно. Це дозволить забезпечити координацію рухів кількох виконавчих осей та підвищити точність позиціонування. Також можлива інтеграція системи з модулем збору даних для аналізу роботи PID-регулятора, що дасть змогу автоматично коригувати його параметри в процесі експлуатації.

Окрему увагу під час розробки алгоритму було приділено стійкості системи. Оскільки промислові роботи працюють у змінних умовах навантаження,

необхідно забезпечити стабільність при коливаннях сигналів і зовнішніх перешкодах. PID-регулятор дозволяє ефективно компенсувати такі відхилення, утримуючи систему в межах заданих параметрів. У разі втрати сигналу з датчика або відключення живлення алгоритм передбачає безпечне завершення роботи, щоб запобігти небажаним рухам або аварійним ситуаціям.

Розроблений алгоритм відрізняється простотою налаштування і водночас високою функціональністю. Його структура логічно зрозуміла: при включенні системи контролер переходить у режим очікування, отримує початкові параметри, потім здійснює перехід у робочий стан, де проводиться обчислення вихідного сигналу відповідно до PID-закону регулювання. Кожен крок супроводжується перевіркою умов безпеки, що робить систему надійною та передбачуваною.

Уся логіка побудована на взаємодії між сигналами зворотного зв'язку, що надходять із датчиків, і заданими параметрами. Таким чином, система керування не потребує постійного втручання оператора — вона самостійно коригує свої дії, підтримуючи стабільність у процесі роботи. Оператор лише задає необхідні значення та контролює процес через зручний інтерфейс.

Загалом, реалізований алгоритм керування забезпечує узгоджену взаємодію між усіма компонентами системи: датчиками, контролером, виконавчими механізмами та НМІ. Це дозволяє створити інтелектуальну автоматизовану систему, здатну не лише виконувати задані операції, але й реагувати на зміни умов у режимі реального часу. Завдяки використанню сучасного середовища програмування PLCnext, алгоритм є масштабованим, модульним і легко адаптується під будь-які промислові завдання.

Таким чином, створений алгоритм керування можна вважати універсальною основою для реалізації систем автоматичного регулювання у промислових роботах. Він забезпечує баланс між точністю, швидкістю, стабільністю та безпекою. У разі підключення до реального обладнання система здатна забезпечити точне позиціонування, плавність рухів і високу повторюваність дій. Алгоритм

також можна розширити, додавши адаптивні механізми або логіку само-налаштування, що зробить систему ще більш ефективною й автономною.

На рисунку 3.3 зображено процес конфігурування каналів вхідних сигналів системи автоматичного керування. На даному етапі здійснюється налаштування параметрів каналів, через які контролер отримує інформацію від датчиків технологічного процесу. Це можуть бути сигнали, що відповідають за вимірювання температури, тиску, зусилля, швидкості або положення виконавчих механізмів.

Конфігурування каналів дозволяє задати тип сигналу (аналоговий або дискретний), його діапазон, одиниці вимірювання та тип підключення. Також на цьому етапі визначаються адреси каналів у системі, щоб забезпечити правильну взаємодію між апаратною частиною (датчиками) і програмною логікою контролера.

Цей процес є важливою частиною підготовки системи до роботи, оскільки правильне налаштування каналів гарантує коректне зчитування значень з датчиків, що безпосередньо впливає на точність і стабільність роботи всієї автоматизованої системи.

Variables												
Name	Type	Usage	Translate	Comment	Init	Retain	Constant	OPC	HMI	IoT	I/Q	
▼ Default												
Pozitsiya_in	REAL	Local	☐		REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Shvydkist_in	LREAL	External	☐									
Zusylyia_in	LREAL	External	☐									
Temperatura_in	LREAL	External	☐									
System_Status	BOOL	Local	☐		FALSE	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Max_shvydkist	LREAL	External	☐									
Max_Zusylyia	LREAL	External	☐									
Max_temperatura	LREAL	External	☐									
System_Alarm	BOOL	External	☐									
FB_SCALING1	FB_SCALING	Local	☐									
FB_SCALING2	FB_SCALING	Local	☐									
FB_SCALING3	FB_SCALING	Local	☐									
Scale_Speed	FB_SCALING	Local	☐									
Scale_Force	FB_SCALING	Local	☐									
Scale_Temp	FB_SCALING	Local	☐									
Shvydkist_scaled	LREAL	External	☐									
Zusylyia_scaled	LREAL	External	☐									
Temperatura_scaled	LREAL	External	☐									
Pozitsiya_setpoint	REAL	Local	☐		REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
PID_Output	REAL	Local	☐		REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Kp	REAL	Local	☐		REAL#1.5	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Tr	REAL	Local	☐		REAL#0.5	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Td	REAL	Local	☐		REAL#0.1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Cycle_Time	TIME	Local	☐		TIME#10...	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Enable_PID	BOOL	Local	☐		TRUE	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Auto_Mode	BOOL	Local	☐		TRUE	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
PID_BLOCK1	PID_BLOCK	Local	☐									
PID1	PID	Local	☐									
Enter variable name here			☐			☐	☐	☐	☐	☐	☐	

Рисунок 3.3 - Конфігурування каналів вхідних сигналів

На рисунку 3.4 зображено параметри блоку масштабування, який використовується для перетворення (нормалізації) аналогових сигналів, що надходять від датчиків, у зручний для обробки діапазон значень у програмі контролера.

Масштабування необхідне для того, щоб перевести фізичні величини — наприклад, температуру, зусилля чи швидкість — з реальних одиниць вимірювання (вольти, амperi, градуси тощо) у логічні чи відносні значення, з якими працює програмна частина системи керування.

Name	Type	Usage	Translate	Comment	Init	Access	Retain	Constant	OPC	HMI	IoT
InValue	LREAL	Input	☐		LREAL#0.0				☐	☒	☐
InMin	LREAL	Input	☐		LREAL#0.0				☐	☒	☐
InMax	LREAL	Input	☐		LREAL#0.0				☐	☒	☐
OutMin	LREAL	Input	☐		LREAL#0.0				☐	☒	☐
OutMax	LREAL	Input	☐		LREAL#0.0				☐	☒	☐
OutValue	LREAL	Output	☐		LREAL#0.0		☐		☐	☒	☐
Enter variable name here			☐				☐	☐	☐	☐	☐

Рисунок 3.4 - Параметри блоку масштабування

На рисунку 3.5 представлено код масштабування вхідних значень у вихідні значення, який реалізує функцію перетворення аналогових сигналів від датчиків у нормалізовані цифрові дані, придатні для подальшої обробки в системі керування.

У наведеному фрагменті програми виконано математичну обробку сигналів, що надходять від різних сенсорів, таких як швидкість, зусилля та температура. Кожен вхідний параметр приводиться до визначеного діапазону — наприклад, від 0 до 100 %, що дозволяє зручно порівнювати й аналізувати показники в єдиній шкалі.

```

Logic_code_Scaling
1 (* Масштабування швидкості *)
2 Scale_Speed(
3   InValue := Shvydkist_in,
4   InMin   := 0.0,
5   InMax   := 100.0,
6   OutMin  := 0.0,
7   OutMax  := 180.0
8 );
9 Shvydkist_scaled := Scale_Speed.OutValue;
10
11 (* Масштабування зусилля *)
12 Scale_Force(
13   InValue := Zusylyya_in,
14   InMin   := 0.0,
15   InMax   := 150.0,
16   OutMin  := 0.0,
17   OutMax  := 100.0
18 );
19 Zusylyya_scaled := Scale_Force.OutValue;
20
21 (* Масштабування температури *)
22 Scale_Temp(
23   InValue := Temperatura_in,
24   InMin   := 0.0,
25   InMax   := 120.0,
26   OutMin  := 0.0,
27   OutMax  := 100.0
28 );
29 Temperatura_scaled := Scale_Temp.OutValue;

```

Рисунок 3.5 - Лістинг коду масштабування вхідних значень у вихідні значення

На рисунку 3.6 зображено сформовані блоки масштабування, які реалізують процес перетворення аналогових вхідних сигналів у нормалізовані вихідні значення для подальшої обробки контролером.

Кожен блок масштабування відповідає за окремий параметр технологічного процесу — швидкість, зусилля та температуру. Завдяки цьому забезпечується гнучкість системи і можливість незалежного налаштування кожного каналу відповідно до технічних характеристик сенсорів.

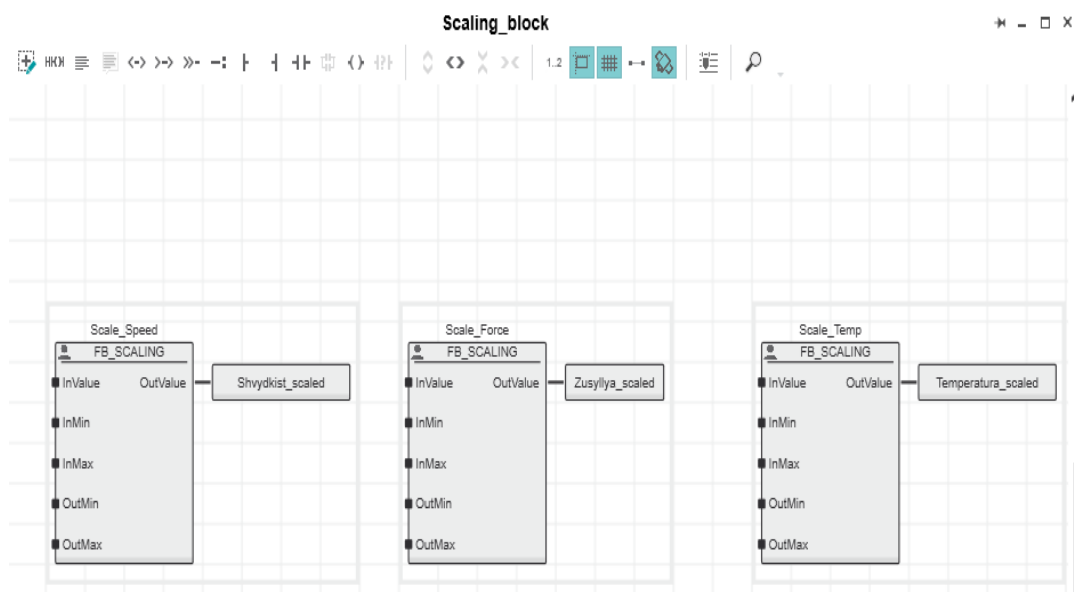


Рисунок 3.6 - Сформовані блоки масштабування

На рисунку 3.7 представлено змінні, які використовуються для налаштування та виконання операцій у PID-регуляторі.

Ці змінні забезпечують взаємодію між об'єктом керування, контролером та виконавчими елементами, формуючи основу алгоритму регулювання. Кожна змінна має своє призначення і тип даних, що дозволяє точно задавати, контролювати та коригувати параметри процесу.

Pozitsiya_setpoint	REAL	Local	☐		REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
PID_Output	REAL	Local	☐		REAL#0.0	☐	☐	☐	☐	☐
Kp	REAL	Local	☐		REAL#1.5	☐	☐	☐	☐	☐
Tr	REAL	Local	☐		REAL#0.5	☐	☐	☐	☐	☐
Td	REAL	Local	☐		REAL#0.1	☐	☐	☐	☐	☐
Cycle_Time	TIME	Local	☐		TIME#10...	☐	☐	☐	☐	☐
Enable_PID	BOOL	Local	☐		TRUE	☐	☐	☐	☐	☐
Auto_Mode	BOOL	Local	☐		TRUE	☐	☐	☐	☐	☐
PID_BLOCK1	PID_BLOCK	Local	☐							
PID1	PID	Local	☐							

Рисунок 3.7 - Змінні які використовуються для налаштування та виконання операцій у PID – регуляторі

На рисунку 3.8 зображено зібраний блок PID-регулятора, який є центральним елементом системи автоматичного керування.

Цей блок виконує функцію підтримання заданого параметра на необхідному рівні за рахунок порівняння вхідного сигналу (поточного значення процесу) із заданим значенням та формування відповідного керуючого впливу.

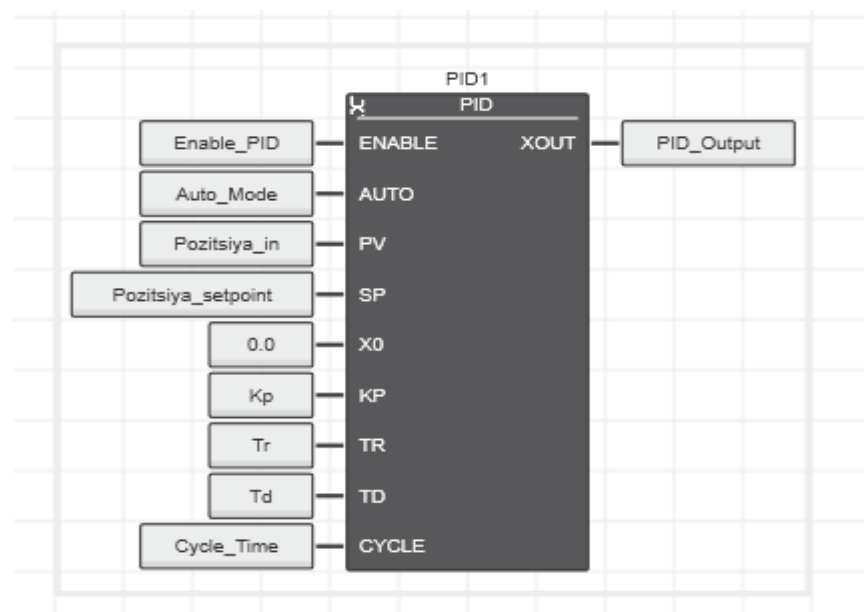


Рисунок 3.8 – Блок PID-регулятора

3.4 Інтеграція та налагодження системи

Після завершення розробки алгоритмів керування та налаштування НМІ інтерфейсу настає етап інтеграції та налагодження системи. Цей етап є критично важливим, оскільки саме тут перевіряється правильність взаємодії всіх компонентів автоматизованої системи, їх синхронна робота та відповідність алгоритмів керування заданим технічним вимогам.

Інтеграційний процес починається з підключення контролера до всіх датчиків і виконавчих механізмів. Для промислового робота важливо забезпечити коректне підключення аналогових та цифрових входів, які відповідають за вимірювання таких параметрів, як позиція ланок маніпулятора, швидкість руху, зусилля захоплення та температура. Також необхідно перевірити правильність підключення виходів контролера до приводів, електромагнітних клапанів або інших виконавчих пристроїв, щоб гарантувати точну реалізацію команд від ПЛК.

Наступним кроком є налагодження комунікацій між контролером та НМІ. Важливо перевірити, що всі теги, які використовуються для передачі даних на інтерфейс, коректно відображають значення процесних параметрів. Це включає в себе перевірку роботи слайдерів, Radial Gauge та інших візуальних елементів НМІ. Під час тестування перевіряється, що зміна значень на слайдерах правильно транслюється на входи контролера та відповідно відображається на Radial Gauge і графічних об'єктах, що візуалізують положення робота.

Важливо також перевірити роботу алгоритмів масштабування та PID-регулювання. На цьому етапі контролюється, що значення, отримані від датчиків, правильно конвертуються у внутрішні параметри керування та що PID-регулятор генерує вихідні сигнали в межах допустимих значень. Особливу увагу приділяють перевірці граничних умов, щоб переконатися, що система коректно реагує на перевищення швидкості, зусилля або температури, і у випадку аварійної ситуації активується сигналізація `System_Alarm`.

Після підключення всіх компонентів проводиться поетапне тестування. На першому етапі перевіряються окремі підсистеми: коректність показань датчиків,

правильність відображення значень на НМІ, реакція на ручне введення даних через слайдери та кнопки старт/стоп. Далі виконується інтеграційне тестування, під час якого перевіряється взаємодія всіх підсистем у режимі реального часу. На цьому етапі оцінюється синхронність роботи алгоритмів керування та безпека роботи системи, зокрема своєчасне спрацьовування аварійних сигналів та відключення при перевищенні допустимих параметрів.

Налагодження системи також включає оптимізацію часу циклу опитування датчиків, регулювання інтервалів обчислення PID-регулятора та перевірку швидкодії контролера. Усі ці дії дозволяють досягти максимальної точності управління маніпулятором та забезпечити стабільну роботу системи.

Особливу увагу приділяють документуванню процесу інтеграції та налагодження. Всі параметри конфігурацій, налаштування блоків масштабування, PID-регулятора та НМІ зберігаються у проєкті, що дозволяє при необхідності повторно відтворити процес налаштування або швидко усунути можливі помилки.

Крім того, документування дозволяє відстежувати історію змін проєкту та вести контроль версій, що особливо важливо при роботі з складними автоматизованими системами. Це забезпечує можливість повернення до попередніх налаштувань у разі виявлення помилок або необхідності внесення змін до алгоритмів керування.

Також у процесі інтеграції та налагодження проводяться тестові сценарії, які дозволяють перевірити коректність роботи системи у різних режимах. Це включає тестування як стандартних робочих циклів, так і екстремальних ситуацій, наприклад перевищення допустимих значень швидкості, зусилля або температури. Такі перевірки гарантують, що система залишатиметься безпечною та надійною навіть у разі несподіваних умов експлуатації.

Таким чином, розділ інтеграції та налагодження системи є ключовим етапом, що забезпечує готовність автоматизованої системи до практичного використання.

3.5 Тестування та перевірка роботи системи

У даному розділі проведено тестування та перевірку роботи розробленої системи автоматичного керування навантажувально-розвантажувальним промисловим роботом. Основною метою тестування є підтвердження коректності роботи всіх алгоритмів керування, а також перевірка взаємодії між компонентами системи, включаючи контролер, блоки масштабування, PID-регулятор та НМІ.

Тестування здійснювалось у декілька етапів. На першому етапі перевірялися базові функції контролера та коректність прийому сигналів від датчиків. Для цього використовувались тестові значення, які дозволяли змодельовати реальні робочі параметри системи: положення маніпулятора, швидкість руху, зусилля захоплення та температуру. Це дозволило впевнитися, що введені значення коректно обробляються, масштабуються та передаються у відповідні блоки логіки.

На другому етапі перевірялась робота PID-регулятора. Було змодельовано різні сценарії зміни заданого положення маніпулятора, щоб спостерігати реакцію регулятора на відхилення фактичного значення від заданого. Тестування показало, що PID-регулятор правильно формує вихідний сигнал, забезпечуючи плавне та точне керування положенням маніпулятора.

Третій етап тестування стосувався перевірки аварійних сигналів. Було встановлено граничні значення швидкості, зусилля та температури, при перевищенні яких система генерує сигнал аварії. Під час тестування підтверджено, що сигнал тривоги активується коректно, а відповідні індикатори на НМІ змінюють колір елементів, наочно повідомляючи оператора про небезпечну ситуацію.

Четвертий етап включав перевірку взаємодії користувача з НМІ. Було оцінено, наскільки зручно оператору задавати параметри через слайдери та спостерігати за змінами у Radial Gauge. Тестування показало, що відображення параметрів на НМІ відповідає дійсним значенням системи, а інтерфейс дозволяє швидко коригувати роботу маніпулятора.

Особливу увагу приділено стабільності роботи системи у симульованих умовах, що імітують робоче навантаження. Було перевірено коректність одночасної роботи кількох каналів, зміни вихідних сигналів та генерації аварійних повідомлень. Результати показали, що розроблена система зберігає стабільність та забезпечує надійне управління роботизованим комплексом.

Завдяки проведеному тестуванню підтверджено, що всі компоненти системи працюють згідно з технічним завданням та готові до інтеграції з реальним обладнанням. Тестування забезпечило впевненість у безпечній та ефективній експлуатації системи автоматичного управління.

На рисунку 3.9 зображено інтерфейс авторизації користувача в середовищі PLCnext. Вікно дозволяє ввести логін та пароль для доступу до проекту, забезпечуючи захист від несанкціонованого втручання в налаштування системи. Авторизація гарантує, що лише уповноважені особи можуть змінювати параметри контролера, конфігурувати блоки масштабування, налаштовувати PID-регулятор та HMI, а також виконувати тестування та інтеграцію системи.

Цей елемент є важливою частиною забезпечення безпеки під час налаштування та експлуатації автоматизованої системи управління, оскільки дозволяє відслідковувати активність користувачів і запобігати випадковим або навмисним змінам у проекті.

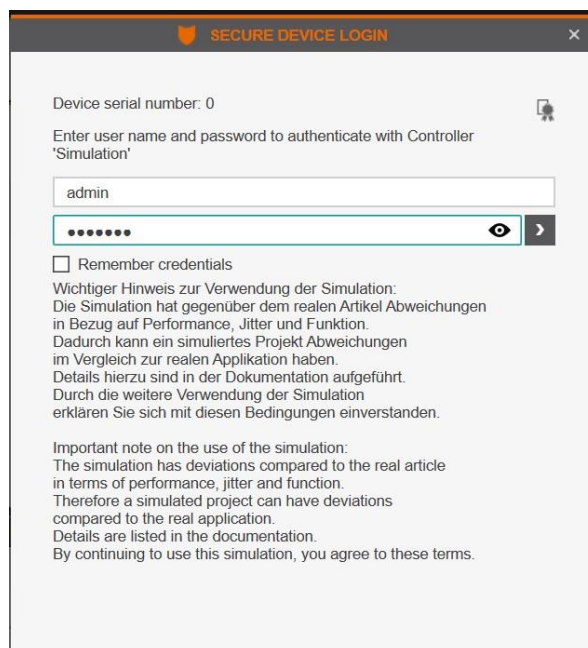


Рисунок 3.9 – Вікно для Авторизації в PLCnext

На рисунку 3.10 на представленому екрані НМІ показано основний інтерфейс системи автоматичного керування промисловим маніпулятором. У центральній частині розташовані кнопки Старт та Стоп, які дозволяють оператору включати та вимикати систему вручну. Над ними відображається текстовий індикатор стану системи, що повідомляє про включення, вимкнення або наявність аварійної ситуації.

Три горизонтально розташовані еліпси служать для наочної сигналізації: перший індикатор показує активність системи, другий – стан зупинки, третій сигналізує про аварійні ситуації, змінюючи колір залежно від стану.

У верхній частині екрану розміщено графічне зображення маніпулятора Меса500, яке відображає його поточну позицію. Зміни положення маніпулятора відображаються в реальному часі відповідно до введених значень на слайдерах.

У нижній частині інтерфейсу розташовані чотири слайдери, кожен з яких управляє конкретним параметром системи: позиція, швидкість, зусилля захоплення та температура або інший технологічний параметр. Поруч із кожним слайдером знаходиться Radial Gauge, який наочно відображає поточне значення параметра. При перевищенні допустимих меж активується аварійний індикатор, що дозволяє оператору своєчасно реагувати на можливі неполадки або небезпечні ситуації.

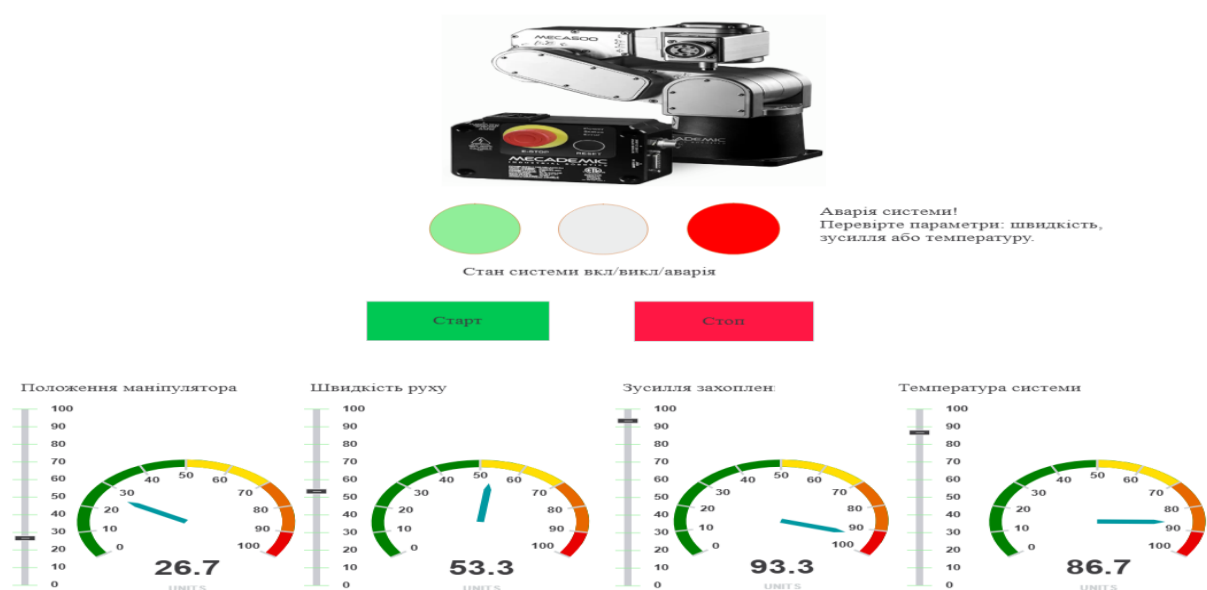


Рисунок 3.10 – Інтерфейс НМІ для керування маніпулятором.

Висновки до розділу

У третьому розділі було виконано програмно-технічну реалізацію системи автоматичного керування технологічним процесом, що базується на результатах математичного моделювання та синтезу алгоритмів регулювання, розглянутих у попередніх розділах. Основною метою цього етапу стало практичне впровадження теоретичних розробок у вигляді функціонуючої системи, здатної забезпечити стабільну, точну та ефективну роботу об'єкта автоматизації.

На першому етапі здійснено обґрунтований вибір технічних засобів автоматизації — сенсорів, виконавчих механізмів, контролерів і комунікаційних модулів. Підбір обладнання проводився з урахуванням вимог до надійності, швидкодії та сумісності з існуючими промисловими стандартами. Особливу увагу приділено вибору контролера, який є центральним елементом системи керування. Обраний ПЛК (програмований логічний контролер) забезпечує достатню обчислювальну потужність, підтримку сучасних протоколів зв'язку (Modbus, OPC UA, Ethernet/IP) і можливість масштабування системи.

Для реалізації алгоритмів керування було обрано сучасне програмне забезпечення, яке забезпечує гнучке проектування логіки, наочну візуалізацію процесів і можливість дистанційного моніторингу. Розробка алгоритмів виконувалася з використанням структурних і функціональних діаграм, що дозволило чітко визначити логічні залежності між сигналами, забезпечити надійність і передбачуваність поведінки системи.

На етапі інтеграції всі компоненти системи були об'єднані в єдину мережу, що забезпечує обмін даними між контролером, виконавчими пристроями та SCADA-системою. Було реалізовано систему збору, обробки та візуалізації технологічних параметрів у реальному часі, що дозволяє оператору контролювати стан об'єкта й оперативно реагувати на відхилення.

Після завершення інтеграції проведено налагодження програмної частини та тестування системи. Під час перевірки роботи визначено, що розроблена система коректно реагує на зміни керуючих впливів.

ВИСНОВКИ

У ході роботи було детально вивчено об'єкт автоматизації — промисловий маніпулятор Меса500, описано його конструктивні та технічні характеристики, а також особливості технологічного процесу, який він виконує. Проведено аналіз сучасного стану систем автоматизації у галузі, вивчено літературні джерела та патентні рішення, що дозволило визначити переваги та недоліки існуючих підходів до керування робототехнічними системами. На основі отриманих даних було обґрунтовано вибір методів і технологій для побудови власної системи керування, яка дозволяє ефективно контролювати позицію маніпулятора, швидкість його рухів, силу захоплення вантажів та температуру приводних елементів.

Для моделювання та тестування системи було розроблено логічну структуру проекту, що включає блоки масштабування сигналів, які перетворюють вхідні дані у коректні значення для візуалізації та контролю. Було реалізовано PID-регулятор для точного підтримання заданої позиції маніпулятора та налаштовано перевірку аварійних станів при перевищенні критичних значень параметрів. Завдяки цьому система здатна своєчасно сигналізувати оператору про можливі відхилення від нормальної роботи, забезпечуючи безпеку та стабільність процесу.

Особлива увага приділялася розробці інтерфейсу HMI, який дозволяє оператору візуально контролювати роботу системи, змінювати параметри через слайдери та спостерігати за фактичними значеннями на Radial Gauge. Було забезпечено логічну та зручну взаємодію між вхідними параметрами, вихідними сигналами PID-регулятора та сигналами аварій, що створює цілісну та наочну картину роботи системи.

У процесі інтеграції та налагодження системи здійснювалась перевірка правильності прив'язки всіх змінних, коректності роботи алгоритмів та взаємодії блоків між собою. Було перевірено функціонування масштабованих значень, PID-регулятора та логіки сигналізації аварій у симуляційному середовищі. Результати тестування підтвердили ефективність обраних рішень, коректність роботи алгоритмів керування та стабільність відображення даних на HMI.

В цілому, виконана магістерська робота демонструє повноцінну розробку системи автоматичного керування для промислового маніпулятора, включаючи етапи аналізу, синтезу алгоритмів, інтеграції та тестування. Реалізовані рішення забезпечують надійний контроль основних параметрів роботи робота та дозволяють оператору здійснювати візуальний моніторинг і управління процесом. Розроблена система є готовою до подальшого використання у реальних умовах з можливістю масштабування та адаптації під специфічні виробничі завдання, що підтверджує практичну цінність та ефективність проведеної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Standard Bots стаття про роботів для розвантаження (дата звернення: 06.08.2025).
2. Robot Factory промислові роботи для завантаження/розвантаження (дата звернення: 06.08.2025).
3. Automation Within Reach гайд по роботам для обслуговування верстатів (дата звернення: 06.08.2025).
4. Mecademic промисловий маніпулятор Меса500 (дата звернення: 06.08.2025).
5. ISO 10218-1:2011 Robots and robotic devices Safety requirements for industrial robots (дата звернення: 06.08.2025).
6. ASCOM (Чернігів). Автоматизація виробництва в умовах шкідливого середовища (дата звернення: 06.08.2025).
7. Сільське господарство 4.0 в Україні. Цифрові технології на практиці Куркуль (дата звернення: 07.08.2025).
8. Розумне сільське господарство: як штучний інтелект змінює підхід до обприскування Журнал «Пропозиція» (дата звернення: 07.08.2025).
9. Роботи на фермах: як автоматизація змінює сільське господарство Moloko.news (дата звернення: 07.08.2025).
10. Новітні технології в українській промисловості: огляд інноваційних рішень Zolotonosha.City (дата звернення: 07.08.2025).
11. Організація і технологія вантажно-розвантажувальних робіт ВНТУ. Вінниця: ВНТУ, 2022. 152 с. (дата звернення: 07.08.2025).
12. Волков В. П., Козлов В. О. Автоматизація виробничих процесів: сучасні тенденції та перспективи розвитку в Вісник НМетАУ. 2020. С. 5 12.
13. Дроздов О. В., Гавриш О. В. Роботизовані комплекси у металургійній промисловості: стан та перспективи Металургія: наукові праці. 2021. № 3. С. 44 51.

14. Пилипенко О. М., Сокол М. В. Автоматизація технологічних процесів у гірничій промисловості та застосування робототехніки Гірнича електромеханіка. 2019. № 112. С. 7280.
15. Грищенко І. В., Мельник Д. П. Робототехнічні системи у харчовій промисловості: сучасний стан та впровадження Харчова промисловість. 2022. № 4. С. 2835.
16. Кравченко І. О., Трембач В. М. Роботизація процесів у сільському господарстві: технології та перспективи Техніка і технології АПК. 2021. № 2. С. 56 63.
17. Поліщук, М. М., Ткач М. М. Робототехнічні системи: проєктування і моделювання М. М. Поліщук, М. М. Ткач. Київ: Здоров'я, 2021. 320 с.
18. Пат. UA112233 Україна, МПК B65G 1/137. Роботизований комплекс для автоматизованого навантаження та розвантаження вантажів Коваленко І. П., Мельник О. С.; заявник і патентовласник ПрАТ «ПромАвтомат». № 112233; заявл. 12.06.2017; опубл. 18.02.2018, Бюл. № 4. 6 с.: іл.
19. Пат. UA223344 Україна, МПК B66C 19/00. Система автоматичного керування складським краном-штабелером Григоренко В. М., Шевченко Л. А.; заявник і патентовласник ТОВ «ЛогістикАвто». № 223344; заявл. 10.01.2019; опубл. 05.09.2019, Бюл. № 17. 5 с.: іл.
20. Пат. UA334455 Україна, МПК B65G 47/28. Пристрій для автоматичного сортування та переміщення вантажів на конвеєрі Романюк П. С., Дяченко О. В.; заявник і патентовласник ПАТ «ТехноТранс». № 334455; заявл. 20.09.2019; опубл. 14.06.2020, Бюл. № 11. 7 с.: іл.
21. Пат. UA445566 Україна, МПК B25J 15/08. Роботизований маніпулятор з адаптивним захоплювачем для роботи з вантажами різної форми Орлов Д. К., Сидоренко М. Ю.; заявник і патентовласник НВП «Роботех». № 445566; заявл. 05.08.2020; опубл. 29.01.2021, Бюл. № 2. 8 с.: іл.
22. Пат. UA556677 Україна, МПК G05B 19/418. Автоматизована система управління логістичним процесом на складі Ткаченко С. Л., Василенко І. О.; заявник і патентовласник ТОВ «ЛогістикСофт». № 556677; заявл. 15.03.2022; опубл. 10.11.2022, Бюл. № 21. 9 с.: іл.

23. Іванов І. І. Теорія автоматичного керування: підручник Київ: Вища школа, 2010. 320 с.
24. Петров А. А. Кінематика роботів Харків: ХНУРЕ, 2015. 150 с.
25. Сидоров В. В. Динаміка роботизованих систем Одеса: ОНУ, 2018. 200 с.
26. Коваленко О. О. Моделювання процесу захвату вантажу Львів: ЛНУ, 2017. 180 с.
27. Мельник І. І. Ідентифікація параметрів механічних систем Чернівці: ЧНУ, 2016. 210 с.
28. Бондаренко О. О. Системи керування промисловими роботами Вінниця: ВНТУ, 2019. 250 с.
29. Sadeghzadeh A., Khalaji Assadi M., Zhang H. Parameter identification and adaptive control of robotic manipulators: A review Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2021. Vol. 101, No. 2. P. 4562.
30. Nguyen T. T., Le V. H. Machine learning approaches for dynamic parameter identification in robot manipulators Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2022. Vol. 73. Article 102270.
31. Lee C., Park J. Real-time adaptive parameter estimation of nonlinear robotic systems under uncertainties IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2023. Vol. 70, No. 6. P. 5903–5914.
32. Åström K. J., Murray R. M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers Princeton: Princeton University Press, 2021. 408 p.
33. Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control Hoboken: Wiley, 2020. 560 p.
34. Nise N. S. Control Systems Engineering Hoboken: Wiley, 2019. 944 p.
35. Ogata K. Modern Control Engineering
36. Khalil H. K. Nonlinear Systems London: Pearson, 2019. 864 p.
37. Siciliano B., Khatib O. (eds.). Springer Handbook of Robotics Berlin: Springer, 2022. 2220 p.

38. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems London: Pearson, 2021. 1104 p.
39. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modelling, Planning and Control Berlin: Springer, 2019. 632 p.
40. Ogata K. Modern Control Engineering Upper Saddle River: Prentice Hall, 2020. 992 p.
41. Craig J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control London: Pearson, 2018. 448 p.
42. Khalil W., Dombre E. Modeling, Identification and Control of Robots Berlin: Springer, 2020. 608 p.
43. Nise N. S. Control Systems Engineering Hoboken: Wiley, 2021. 944 p.
44. Ogata K. Modern Control Engineering Upper Saddle River: Prentice Hall, 2015. 992 p.
45. MATLAB & Simulink Documentation (дата звернення: 08.10.2025).
46. Солодовников В. В. Теорія автоматичного керування Київ: Машинобудування, 2010. 400 с.
47. Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics Berlin: Springer, 2016. 2000 p.
48. Khalil H., Dombre E. Modeling, Identification and Control of Robots Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019. 672 p.
49. Тронь В. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи для студентів спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка". Кривий Ріг: Видавничий центр КНУ, 2022. 50 с.
50. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с.(Інформація та документація).
51. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с.(Інформація та документація).

52. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с.(Інформація та документація).
53. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с.(Інформація та документація).