

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Розроблення робототехнічної системи виробничого призначення  
за принципом модульності  
(тема)

Виконав:  
здобувач 4 року навчання,  
групи АКТСІ-21-3  
Михайло СТРЕЛЬЧЕНКО  
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація  
та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системна інженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Наталія ДЕМСЬКА  
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАР Ігор НЕВЛЮДОВ  
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Стрельченко Михайло Дмитрович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"04" червня 2025 р.



Михайло СТРЕЛЬЧЕНКО

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ  
Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський)  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва)  
Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна  
Освітня програма \_\_\_\_\_ Системна інженерія  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« 28 » квітня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Здобувачеві \_\_\_\_\_ Стрельченку Михайлу Дмитровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Розроблення робототехнічної системи виробничого  
призначення за принципом модульності

затверджена наказом університету від 19.05.2025 р. № 391 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 11.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

3.1 Платформа: Arduino Uno / Mega + Bluetooth-модуль HC-05

3.2 Середовище розробки: Arduino IDE, MIT App Inventor

3.3 Мова програмування: C++ (Arduino), Blockly (App Inventor)

3.4 Можливість апаратної реалізації: так, з використанням 3D-друкованих  
компонентів і серводвигунів

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

4.1 Вступ

4.2 Визначення мети, об'єкта та предмета розробки

4.3 Аналіз предметної області: модульні промислові робототехнічні системи,  
типи захватних пристроїв, архітектура керування

4.4 Розробка загальної структури системи та вибір обладнання

4.5 Розробка програмного забезпечення з використанням модульного підходу

4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Демонстраційний матеріал в форматі (\*.ppt), А4 –11 сторінок

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Актуальність роботи, постановка задачі	28.04.25 – 30.04.25	викон.
2	Визначення мети об'єкту і предмету розробки	01.05.25 – 08.05.25	викон.
3	Аналіз предметної області	09.05.25 – 13.05.25	викон.
4	Розробка структурної схеми та вибір апаратних компонентів системи	14.05.25 – 19.05.25	викон.
5	Розробка програмного забезпечення для управління модульною робототехнічною системою	20.05.25 – 03.06.25	викон.
6	Подання роботи на перевірку Інтернетсервісом StrikePlagiarisma	04.06.25	викон.
7	Оформлення пояснювальної записки	06.06.25	викон.

Дата видачі завдання 28.04.2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Михайло СТРЕЛЬЧЕНКО \_\_\_\_\_  
(власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

доцент Наталія ДЕМСЬКА \_\_\_\_\_  
(посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 62 с., 1 табл., 24 рис., 2 дод., 35 джерел.

РОБОТОТЕХНІЧНА СИСТЕМА, МОДУЛЬНІСТЬ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, КОНТРОЛЕР, ТЕСТУВАННЯ.

Об'єкт розробки – робототехнічна система виробничого призначення, побудована за принципом модульності.

Предмет розробки – апаратна та програмна структура модульної роботизованої системи для виконання виробничих операцій.

Методи дослідження: аналіз технічних рішень у сфері модульної робототехніки, моделювання структури системи, розробка програмного забезпечення, тестування апаратних і програмних модулів.

Мета роботи – створення лабораторного макета робототехнічної системи з модульною архітектурою, яка дозволяє адаптувати як апаратну, так і програмну частину під потреби виробничих процесів. Система повинна ефективно виконувати дії із захоплення та переміщення деталей, а також підтримувати швидку заміну виконавчих і сенсорних модулів.

У кваліфікаційній роботі розглянуто типи промислових роботів і захватів, обґрунтовано доцільність модульного підходу. Розроблено структурну схему системи, обрано оптимальні компоненти: мікроконтролер, серводвигуни та інтерфейси зв'язку. Створено програмне забезпечення для керування маніпулятором через мобільний застосунок по Bluetooth. Проведено тестування функціонування всіх модулів і оптимізацію алгоритмів.

Результати підтверджують ефективність модульного підходу при створенні гнучких робототехнічних засобів. Система може бути адаптована до різних виробничих задач, а також використовуватись у навчальних цілях.

## ABSTRACT

Explanatory note: 62 pages, 1 tables, 24 figures, 2 appendices, 35 references.

ROBOTIC SYSTEM, MODULARITY, CONTROL SYSTEM, SOFTWARE, CONTROLLER, TESTING.

The object of the development is a production-purpose robotic system designed according to the principle of modularity.

The subject of the development is the hardware and software structure of a modular robotic system for performing industrial operations.

Research methods include analysis of technical solutions in the field of modular robotics, system architecture modeling, software development, and testing of both hardware and software modules.

The aim of this work is to create a laboratory prototype of a robotic system with a modular architecture that allows adaptation of both hardware and software components to various manufacturing tasks. The system is intended to efficiently perform part gripping and transfer operations and to support quick replacement of actuators and sensor modules.

The qualification project reviews different types of industrial robots and grippers, and substantiates the feasibility of the modular approach. The system's structural diagram was developed, and the optimal components were selected, including the microcontroller, servo drives, and communication interfaces. Software was created to control the manipulator via a mobile application using Bluetooth connection. The functionality of all modules was tested, and the control algorithms were optimized.

The results confirm the effectiveness of the modular approach in building flexible robotic tools. The developed system can be adapted to a wide range of industrial tasks and may also be used as an educational or research platform.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	7
Вступ .....	8
1 Аналіз робототехнічних систем і технічного завдання .....	10
1.1 Аналіз захватних пристроїв та інструментів сучасних промислових роботів.....	10
1.2 Огляд модульних архітектур і промислових реалізацій робототехнічних систем .....	19
2 Розробка конструкції робототехнічної системи .....	23
2.1 Розробка структурної схеми системи .....	23
2.2 Вибір компонентної бази .....	24
2.2.1 Аналіз мікроконтролера для модульної системи .....	24
2.2.2 Аналіз сервоприводів та електронних компонентів .....	27
2.3 Дослідження роботи сервоприводу та його позиціонування .....	30
2.4 Висновки до першого розділу .....	33
3 Проектування модульної робототехнічної системи виробничого призначення .....	35
3.1 Розробка загальної структури робототехнічної системи .....	35
3.2 Обґрунтування вибору принципу модульності .....	40
3.3 Аналіз апаратної модульності: змінні захватні пристрої .....	42
3.4 Програмна модульність: розробка адаптивного програмного забезпечення .....	44
3.5 Висновки до розділу .....	53
4 Охорона праці .....	55
4.1 Загальні положення .....	55
4.2 Небезпеки та шкідливі фактори .....	55
4.3 Заходи з охорони праці .....	56
4.4 Пожежна безпека .....	56

4.5 Санітарно-гігієнічні умови .....	57
4.6 Висновки до розділу .....	57
Висновки .....	58
Перелік джерел посилання .....	60
Додаток А Повний програмний код для керування модульною робототехнічною системою .....	63
Додаток Б Демонстраційний матеріал .....	68

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЗП – захватний пристрій;

ОМ – об'єкт маніпулювання;

ПР – промисловий робот;

РТК – робототехнічний комплекс;

РТС – робототехнічні системи;

САПР – система автоматизованого проектування;

СК – система керування;

ШІ – штучний інтелект;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

## ВСТУП

Розвиток виробничих робототехнічних систем є пріоритетним напрямом сучасної інженерії, оскільки ці системи широко застосовуються в автоматизованих технологічних процесах, забезпечуючи високу точність, продуктивність та ефективність. Зокрема, все більшого значення набувають роботизовані комплекси, здатні адаптуватися до змінних умов виробництва завдяки модульному підходу до їх побудови. Використання модульної архітектури дозволяє підвищити гнучкість, масштабованість і ремонтпридатність робототехнічних систем [1].

Ефективність та надійність таких систем залежать не лише від конструктивних особливостей, але й від програмного забезпечення та інтеграції виконавчих і сенсорних модулів. Вивчення та оптимізація цих складових є актуальним завданням у процесі розробки сучасних роботизованих рішень для виробничих потреб [2].

Мета роботи – створення лабораторного макета робототехнічної системи з модульною архітектурою, яка дозволяє адаптувати як апаратну, так і програмну частину під потреби виробничих процесів. Система повинна ефективно виконувати дії із захоплення та переміщення деталей, а також підтримувати швидку заміну виконавчих і сенсорних модулів.

Об'єкт розробки – процес виконання виробничих операцій шляхом використання модульної робототехнічної системи.

Предмет розробки – програмно-апаратна реалізація та алгоритми керування модульною робототехнічною системою на базі Arduino.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних конструкцій промислових роботів і підходів до модульного проектування;
- розробити структурну схему робототехнічної системи;
- обґрунтувати вибір елементної бази для апаратної реалізації;
- розробити програмне забезпечення для керування системою;

– зібрати та протестувати лабораторний макет.

Кваліфікаційну роботу виконано згідно ДСТУ 3008 – 15 [3] та керуючись методичними вказівками [4], положенням про протидію плагіату [5] і навчальним посібником з написання кваліфікаційної роботи бакалавра [6].

# 1 АНАЛІЗ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ І ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

## 1.1 Аналіз захватних пристроїв та інструментів сучасних промислових роботів

Сучасні робототехнічні системи (РТС) є ключовим елементом автоматизації промислових процесів [1]. Їхнє застосування дозволяє значно підвищити ефективність, точність та гнучкість виробництва, забезпечуючи повторюваність і стабільну якість продукції незалежно від складності завдань.

Робототехнічна система (рис. 1.1), як правило, складається з кількох основних модулів: механічної частини, системи керування, сенсорної підсистеми, виконавчих механізмів і програмного забезпечення. Комбінація цих елементів утворює цілісну платформу для виконання широкого спектру операцій у різних галузях промисловості.

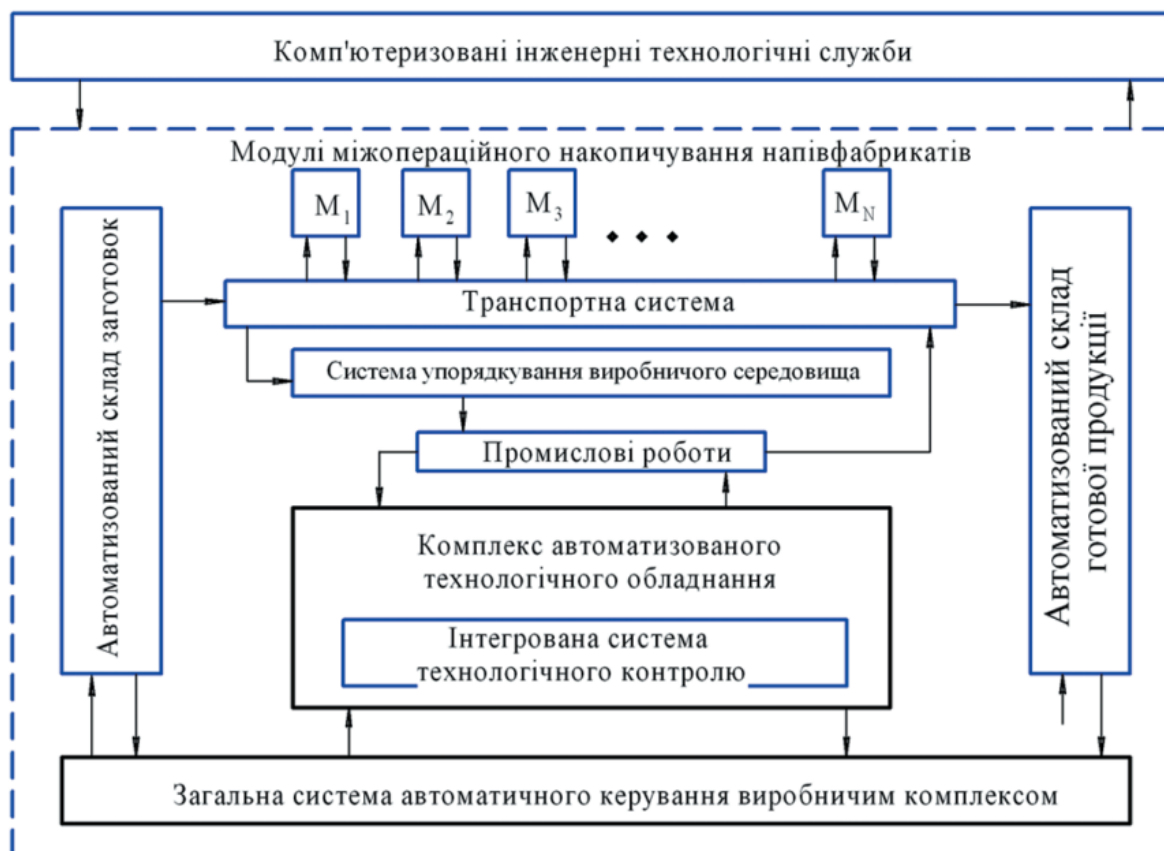


Рисунок 1.1 – Узагальнена структура робототехнічної системи [7]

На відміну від класичних роботів-маніпуляторів, які здебільшого мають фіксовану конструкцію, сучасні РТС, побудовані за принципом модульності, дозволяють здійснювати швидку заміну окремих елементів конструкції. Такий підхід забезпечує адаптацію системи під специфіку виробничих завдань без потреби повної заміни обладнання [7].

Модульність у робототехніці реалізується як на апаратному рівні (змінні захватні пристрої, інструменти, адаптери, маніпулятори), так і на програмному (гнучке програмне середовище, налаштовувані алгоритми, інтерфейси для інтеграції з іншими системами). Це дозволяє оптимізувати виробничий процес за рахунок простоти переналаштування РТС під нові умови експлуатації, без залучення спеціалізованих технічних спеціалістів для перепрограмування або переобладнання машини [7].

Основою структури будь-якої РТС є механічний каркас, який виконує функції опори для виконавчих органів. До нього приєднуються маніпулятори або захватні пристрої, сенсори для зчитування інформації з навколишнього середовища та модулі приводу, які забезпечують рух (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Приклади конструкції маніпуляторів з сенсорами та захватом [7]

Керування робототехнічною системою відбувається за допомогою центрального контролера, який виконує обчислення, обробку сигналів від датчиків і передає команди виконавчим механізмам. Завдяки використанню відкритих архітектур і модульного підходу, програмне забезпечення такої системи може бути доповнено або змінено відповідно до завдань конкретного виробництва.

Конструктивні особливості РТС часто визначаються призначенням і характером завдань: у системах для складання переважають модулі з високою точністю позиціонування, у вантажопідійомних – модулі з підвищеною несучою здатністю, а в системах для обробки матеріалів – модулі, які забезпечують точний контроль траєкторії руху.

Також важливою характеристикою є кількість ступенів свободи (рис. 1.3), яка визначає, наскільки гнучко робот може позиціонувати захватний пристрій у просторі. Зазвичай для промислових застосувань використовується від 4 до 6 ступенів свободи, що дозволяє маніпулювати об'єктами з високою точністю в тривимірному просторі.



Рисунок 1.3 – Приклади промислових роботів з різною кількістю ступенів свободи

Під час розробки модульної РТС враховуються такі параметри:

- тип конструкції (портальна, шарнірно-зчленована, паралельна);
- робоча зона (область доступності захватного пристрою);
- вантажопідйомність;
- точність позиціонування;
- гнучкість програмного забезпечення.

Ще одним важливим аспектом аналізу структури робототехнічних систем є вибір типу приводу, який безпосередньо впливає на динаміку, точність і ефективність роботи системи. Серед найбільш поширених типів приводів застосовуються електричні, гідравлічні та пневматичні. Електричні приводи вирізняються високою точністю позиціонування та широким діапазоном налаштувань, у той час як гідравлічні системи застосовуються для роботів, що працюють із важкими вантажами. Пневматичні приводи здебільшого використовуються у випадках, коли важлива швидкість виконання циклу при відносно невеликій силі.

Щоб забезпечити взаємодію робота з об'єктами навколишнього середовища, до структури РТС обов'язково включають сенсорні системи. Датчики забезпечують зворотний зв'язок, що дозволяє роботу коригувати свої дії в реальному часі, адаптуватися до змінних умов середовища і гарантувати безпеку взаємодії з людиною або іншими машинами.

Особливе місце у структурі займає система програмного забезпечення, яка виконує функцію «мозку» робототехнічної системи. Вона дозволяє не тільки керувати виконавчими механізмами, а й аналізувати дані, що надходять із сенсорів, а також формувати оптимальні траєкторії руху відповідно до заданих критеріїв ефективності та безпеки.

Для ефективного функціонування робототехнічної системи надзвичайно важливою є її здатність до самодіагностики та оперативного реагування на помилки. Сучасні РТС комплектуються вбудованими модулями контролю працездатності, які постійно перевіряють справність механічних вузлів,

стабільність роботи програмного забезпечення та правильність виконання заданих команд.

Робототехнічні системи також відрізняються за способом взаємодії з людиною-оператором. Це може бути як повністю автономна система, яка самостійно приймає рішення про свої дії, так і колаборативний робот (cobot), який виконує завдання разом із людиною, реагуючи на її команди та жести у реальному часі.

Крім того, важливою характеристикою РТС є її енергетична ефективність, яка досягається завдяки оптимізації алгоритмів руху, застосуванню сучасних систем рекуперації енергії та використанню енергоощадних приводів.

На завершення варто зазначити, що грамотний аналіз структури робототехнічної системи дозволяє ще на етапі проектування передбачити потенційні вузькі місця, знизити ризики поломок та забезпечити ефективну інтеграцію РТС у виробничий процес. Завдяки постійному розвитку комп'ютерних технологій і сенсорних систем, сучасні робототехнічні комплекси демонструють все більший рівень автономності, адаптивності та здатності до самоорганізації, що значно розширює їхню сферу застосування.

ПР є універсальним технічним засобом, що може виконувати широкий спектр завдань у залежності від умов експлуатації та поставленої цілі. Для здійснення конкретної операції до маніпулятора підбирається спеціальний робочий інструмент або захватний пристрій, який забезпечує надійне захоплення та утримання об'єкта під час виконання технологічної дії.

Захватний пристрій (ЗП) є ключовим елементом конструкції ПР, оскільки саме він безпосередньо контактує з об'єктом, фіксує його положення і дозволяє переміщувати з однієї позиції в іншу. Від типу ЗП залежить ефективність і точність виконання завдання, тому його вибір здійснюється з урахуванням форми, маси та особливостей об'єкта.

За способом виконання функцій ЗП класифікують на кілька основних типів. Наприклад, захвати, що здатні змінювати просторове положення об'єкта, виконують функцію переміщення за рахунок керованого руху своїх захватних елементів. До таких відносяться гнучкі маніпулятори з механічними "пальцями", які нагадують за конструкцією людську руку.

Ще один тип – центруючі захватні пристрої. Вони призначені для точного вирівнювання об'єкта відносно осі або площини симетрії. Найчастіше це механічні конструкції, оснащені системою синхронізованих рухомих губок, які можуть мати призматичну форму для надійної фіксації деталей. Іноді центрування виконується за допомогою пневматичних камер або еластичних елементів, які підлаштовуються під форму об'єкта.

Окрему групу складають базуючі ЗП, основною задачею яких є фіксація деталі відносно певної опорної поверхні. Такий принцип закладено як у допоміжних опорних елементах, так і в захватах, які суміщають функції базування та утримання.

Фіксуючі ЗП зберігають положення об'єкта яке той мав у момент захоплення.

Пасивні ЗП, що не забезпечують базування або фіксації об'єкта, майже не застосовуються для оснащення ПР [7].

Найпоширенішими на виробництві ЗП є:

- механічний ЗП;
- вакуумний ЗП;
- магнітний ЗП.

Механічний ЗП – це пристрій, який може утримувати об'єкт за допомогою сили стискання. Зазвичай він виконується у вигляді двопальцевого захвату, але може мати також й іншу форму (рис. 1.4) [8]. Даний вид ЗП використовують при переміщенні, сортуванні, розвантаженні деталей. Для більш надійного контакту та запобігання вислизанню ОМ на пальці захвату можуть

приєднуватися губки, зроблені з шорстких матеріалів або можуть робитися насічки. Механічні пристрої є найбільш поширеними конструкціями, які мають багато виконань. Всі вони складаються із таких основних частин: привід; проміжні передачі, важелі із затискними елементами; корпусні та базові деталі; інформаційно-вимірювальні елементи [8].



Рисунок 1.4 – Механічний захватний пристрій із зубчастою передачею [8]

Найбільше застосування серед захватних пристроїв отримали системи, які працюють на основі пневматичного, гідравлічного чи електричного приводу. При цьому двигун приводу може розташовуватись як безпосередньо всередині корпусу захватного пристрою, так і бути винесеним на інші вузли чи ланки конструкції робота [8].

У ролі передавальних механізмів між виконавчим приводом і затискними елементами широко використовуються різні типи кінематичних схем: важільні системи, клинові механізми, гвинтові пари, зубчасто-рейкові передачі та інші види передавальних вузлів [8].

В залежності від кількості задіяних механізмів захвати поділяються на

прості – ті, що мають тільки один виконавчий механізм, та комбіновані – в яких об'єднано декілька механізмів для забезпечення більш складних або точних операцій [8].

Затискні елементи хватних пристроїв підбираються згідно з формою, геометрією та розмірами деталей, які підлягають маніпулюванню. При цьому характер руху затискних частин може бути як поступальним, так і обертальним, що залежить від конкретних задач захвату та утримання об'єкта [9].

Із найбільш типових механічних конструкцій ЗП можна виділити такі:

- захвати з пружно-силовим затиском деталей за рахунок деформації пружних ланок, тобто без індивідуального приводу, або з приводом тільки на розтискання деталі;

- захвати із важільно-шарнірними механізмами, де поступальний рух тяги приводу передається в обертальний рух затискних важелів; – захвати із зубчастою передачею;

- захвати із зубчасто-рейковою передачею;

- захвати із клинковою передачею;

- захвати із плоско-паралельним рухом затискних губок для утримання плоских деталей;

- захвати із змінними затискними елементами (губками) [9].

Вакуумний ЗП – це пристрій, який може утримувати ОМ за допомогою розрідження повітря в замкненій порожнині – присмоктувачі (рис. 1.5).

Такий пристрій, як правило, використовують задля того, щоб переносити тонкі матеріали, які неможливо підняти ні механічним, ні магнітним ЗП. Це такі матеріали як плівка, пластик у вигляді листів, пінопласт, папір тощо.

Магнітний ЗП – це пристрій являє собою механізм, який утримує об'єкт маніпуляції завдяки діям магнітного поля, створеного постійним або електричним магнітом (рис. 1.6). Такі захвати активно застосовуються у сфері важкого машинобудування, де обробляються масивні металеві заготовки з феромагнітних матеріалів.



Рисунок 1.5 – Вакуумний хватний пристрій з насосом [10]



Рисунок 1.6 – Електромагнітний хватний пристрій [10]

Основною перевагою подібних пристроїв є простота конструкції та відсутність необхідності в механічних затискних елементах для фіксації об'єкта. Водночас істотним недоліком є обмеження в роботі – цей тип хватів може взаємодіяти виключно з деталями, які володіють магнітними властивостями.

ПР можуть бути обладнані різними видами інструментів, залежно від специфіки операцій, які необхідно виконувати. У таких випадках функцію

робочого органу виконує не захватний пристрій, а спеціалізований інструмент, який закріплюється на кінці маніпулятора замість стандартного ЗП.

До подібних інструментів належать: обладнання для точкового зварювання, пристрої для паяння електронних компонентів, апарати для нанесення лакофарбових матеріалів, ріжучий інструмент для обробки металу, а також екструдери для 3D-друку.

## 1.2 Огляд модульних архітектур і промислових реалізацій робототехнічних систем

Сучасні роботизовані системи дедалі частіше проектуються з урахуванням можливості легкої заміни захватних модулів. Такий підхід дозволяє значно розширити функціональність робота та забезпечити його адаптацію до виконання різних типів завдань без зміни всієї конструкції.

Наприклад, на одному й тому ж маніпуляторі може встановлюватися механічний захват, вакуумний присос, електромагнітний тримач або навіть спеціалізований інструмент для пайки, зварювання чи фарбування.

Конструктивно, такі роботи зазвичай мають уніфіковане кріплення для встановлення змінних модулів. Це може бути як механічне кріплення, так і магнітне з електричними контактами для живлення та керування. Важливим елементом такої системи є механізм швидкої заміни – іноді це робиться вручну, але в сучасних розробках часто застосовуються автоматизовані інтерфейси, які дозволяють змінювати модулі без участі людини, що особливо актуально в умовах безперервного виробництва.

Ще одним важливим конструктивним аспектом є розподіл маси та розміщення виконавчих приводів. Для зменшення навантаження на рухомі ланки, важкі елементи (наприклад, серводвигуни) часто встановлюються ближче до основи. Це дозволяє зберегти стабільність конструкції навіть при зміні модулів, які можуть мати різну вагу та розміри.

Завдяки змінності захватних модулів, один і той самий робот може бути

використаний у різних технологічних процесах, що значно підвищує ефективність та економічну доцільність його використання. Наприклад, у виробничому циклі один модуль може захоплювати заготовку, другий – виконувати обробку, а третій – переміщати готову деталь у складське місце.

Однак такі конструкції мають і свої обмеження. Потрібна точність позиціонування при зміні модулів, а також механічна надійність елементів кріплення. Крім того, іноді виникає необхідність у калібруванні кожного нового захвату, щоб забезпечити правильну роботу системи управління.

Таким чином, змінні захватні модулі дозволяють створювати більш гнучкі, багатоцільові роботизовані комплекси, здатні ефективно працювати в умовах змінюваних задач виробництва (рис. 1.7).

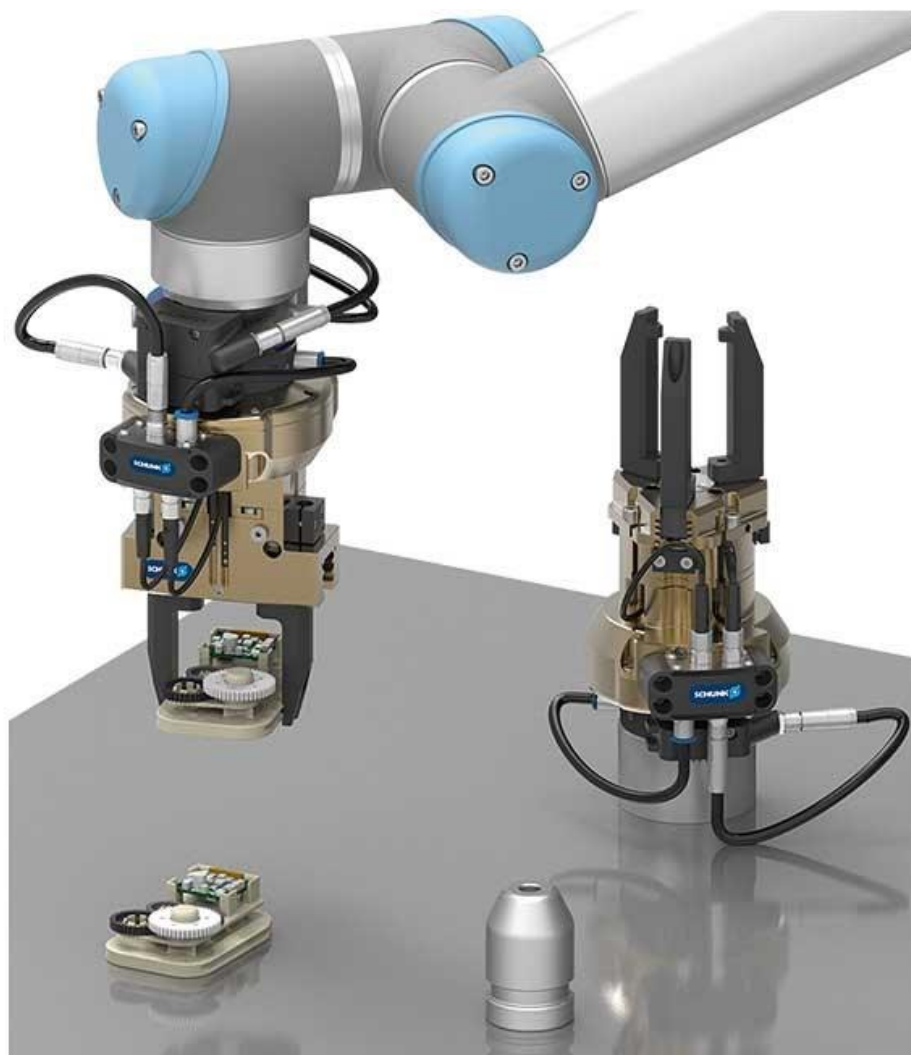


Рисунок 1.7 – Робот-маніпулятор зі змінним захватним модулем [11]

У промислових роботизованих системах, які базуються на модульних рішеннях, ключовим фактором є гнучкість і адаптивність конструкції. Такі системи дозволяють швидко змінювати робочі модулі, що робить їх особливо корисними у виробничих процесах, де необхідна зміна завдань або видів обробки. Наприклад, модульні системи (рис. 1.8) можуть включати різні захватні пристрої, інструменти для зварювання, паяння, обробки матеріалів або перевезення вантажів.



Рисунок 1.8 – Модульна роботизована система для промислового використання [12]

Модульні роботизовані системи зазвичай складаються з кількох основних компонентів: базової платформи, яка може бути мобільною або стаціонарною, і змінних робочих модулів. Кожен модуль може виконувати конкретну функцію, що дозволяє роботам швидко адаптуватися до різних умов виробництва. Це дозволяє значно знизити витрати на придбання нових роботизованих систем для кожного типу завдання.

При розробці таких систем важливо враховувати можливості підключення

різних модулів до єдиного контролера, який забезпечує синхронну роботу різних елементів. Це дозволяє досягти високого рівня автоматизації, де управління кожним модулем може здійснюватися централізовано.

Приміром, для обробки різних типів матеріалів в одній виробничій лінії можуть використовуватися різні модулі. Модуль для обробки металу може бути замінений на модуль для обробки пластика чи скла, що дозволяє значно розширити можливості системи без зміни основної платформи. Крім того, модульні системи часто використовують універсальні кріплення та швидкознімні механізми, що дозволяють змінювати модулі за лічені хвилини без необхідності в складних налаштуваннях.

Однією з головних переваг таких рішень є їхня масштабованість. Завдяки модульному підходу, можна адаптувати робочі процеси до конкретних виробничих потреб, змінюючи або доповнюючи систему в залежності від виробничих вимог.

Однак варто зазначити й певні недоліки модульних рішень. По-перше, збільшення кількості змінних модулів може призвести до підвищених витрат на закупівлю і зберігання додаткових елементів. По-друге, складність інтеграції різних модулів у єдину систему інколи може створювати проблеми в частині сумісності та налаштувань. Крім того, система може стати більш вразливою до збоїв через те, що один пошкоджений модуль може призвести до зупинки всього виробничого процесу.

## 2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ

### 2.1 Розробка структурної схеми системи

На початкових етапах розробки проекту важливо створити структурну схему системи, оскільки вона дозволяє визначити основні компоненти системи та їх взаємодію, що сприяє подальшій розробці апаратної та програмної частини. Структурна схема є основою для розуміння принципу роботи всієї системи і забезпечує наочне зображення процесу взаємодії між різними елементами.

У даному проекті для керування роботизованою рукою обрано платформу Arduino UNO як основний керуючий блок. На схемі (рис. 2.1) також присутні додаткові компоненти, зокрема Bluetooth модуль HC-05 для бездротового керування та серводвигуни для виконання рухів. Також важливим елементом є модуль PCA9685, який відповідає за управління серводвигунами через шину I2C.

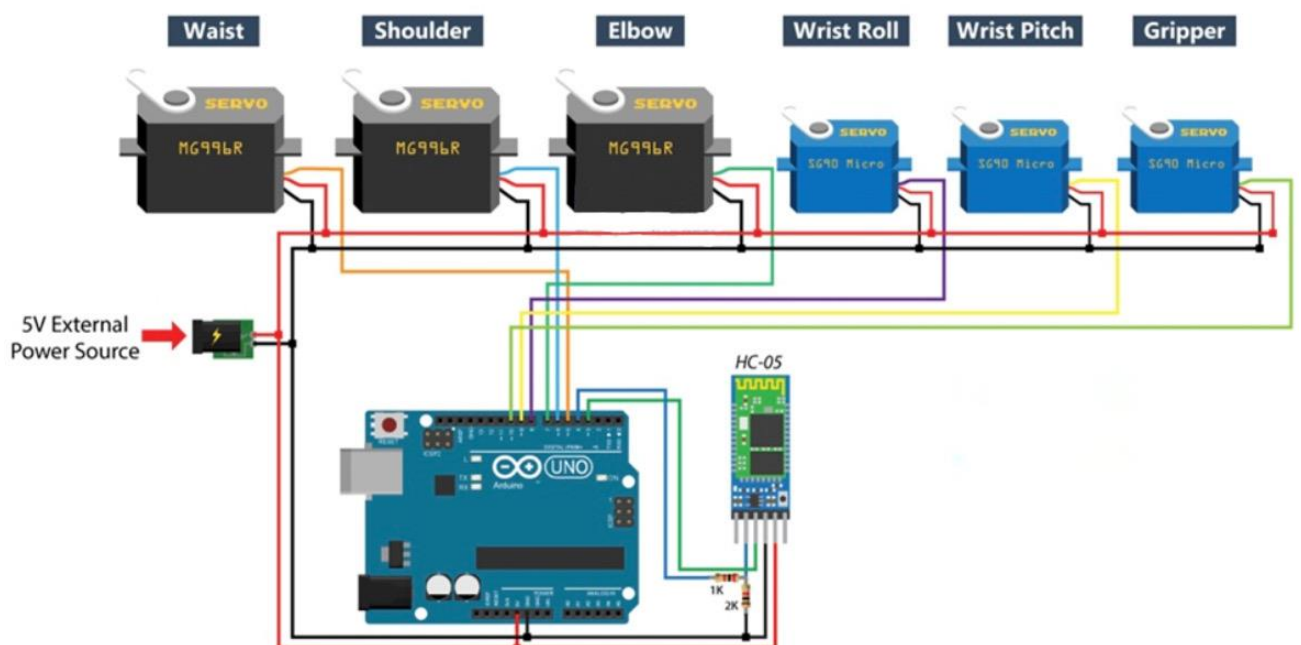


Рисунок 2.1 – Схема підключення Arduino до виконавчих елементів

Схема зображує підключення основних елементів системи, включаючи зв'язки між керуючим блоком, виконавчими механізмами та модулями зв'язку. Усі ці компоненти працюють разом, забезпечуючи ефективне керування роботизованою рукою через мобільний додаток, який взаємодіє з системою через Bluetooth.

## 2.2 Вибір компонентної бази

### 2.2.1 Аналіз мікроконтролера для модульної робототехнічної системи

При створенні модульної робототехнічної системи важливим етапом є вибір керуючого модуля, який забезпечить стабільну взаємодію між усіма виконавчими елементами, датчиками та допоміжними модулями, а також дозволить ефективно масштабувати або змінювати функціонал системи відповідно до задач виробничого процесу.

У якості центрального блоку керування в конструкції роботизованого маніпулятора було обрано платформу Arduino UNO, яка базується на мікроконтролері ATmega328P.

На рисунку 2.2 представлено зовнішній вигляд плати Arduino UNO, яка виконує роль контролера в системі.



Рисунок 2.2 – Плата мікроконтролера Arduino UNO R3 [13]

Arduino UNO є однією з найпопулярніших апаратних платформ для побудови робототехнічних прототипів завдяки своїй простоті використання, підтримці широкого спектру виконавчих механізмів, великій спільноті розробників і стабільному середовищу розробки Arduino IDE.

Однією з ключових переваг Arduino UNO є наявність необхідної кількості цифрових та аналогових входів/виходів для підключення модулів комунікації, датчиків та виконавчих пристроїв (рис. 2.3). Це дозволяє побудувати складні схеми управління рухом роботизованого маніпулятора.

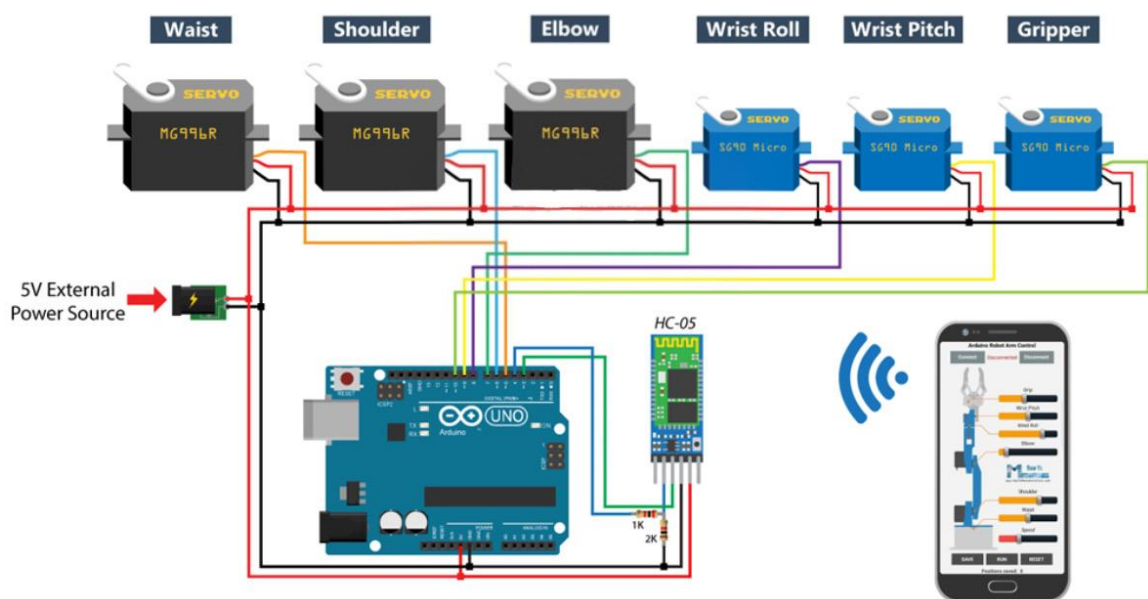


Рисунок 2.3 – Схема підключення Arduino до виконавчих елементів

У реалізованій системі плата Arduino UNO відповідає за координацію роботи шести сервоприводів, які керують такими вузлами маніпулятора:

- Waist обертає основу маніпулятора навколо вертикальної осі;
- Shoulder піднімає або опускає плече маніпулятора;
- Elbow змінює кут між плечем і передпліччям;
- Wrist Roll обертає зап'ястя навколо своєї осі;
- Wrist Pitch нахиляє зап'ястя вгору або вниз;
- Gripper захоплює та утримує об'єкти;

Для реалізації бездротового керування системою передбачено

використання модуля HC-05 Bluetooth, який дозволяє передавати команди від смартфона або іншого пристрою без використання кабелів, що значно підвищує гнучкість та зручність експлуатації маніпулятора.

Зважаючи на значні енергетичні навантаження, які створюють сервоприводи при роботі, для їх живлення передбачено окремий канал з зовнішнього джерела постійного струму (5В). Це дозволяє уникнути перевантаження мікроконтролера і забезпечує стабільну роботу всіх виконавчих модулів.

Завдяки використанню Arduino UNO як центрального вузла, реалізована роботизована система повністю відповідає принципу модульності:

- система дозволяє просто підключати та замінювати виконавчі елементи;
- архітектура підтримує масштабування під нові завдання;
- програмне забезпечення легко адаптується під конкретні алгоритми роботи;

На рисунку 2.4 зображено зібраний макет роботизованого маніпулятора з використанням Arduino UNO як центрального керуючого модуля, сервоприводів та модуля бездротового зв'язку HC-05.

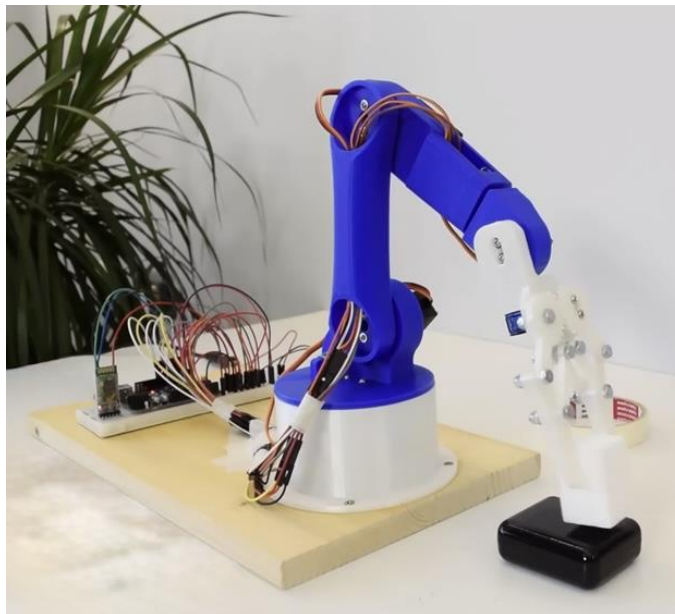


Рисунок 2.4 – Реалізований макет роботизованого маніпулятора з використанням плати Arduino UNO як центрального керуючого модуля

Основні характеристики наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики платформи Arduino UNO [12]

Характеристика	Значення
Мікроконтролер	ATmega328P
Робоча напруга	5 В
Вхідна напруга (рекомендована)	від 7 В до 12 В
Вхідна напруга (гранична)	від 6 В до 20 В
Цифрові входи/виходи	14
Аналогові входи	6
Флеш-пам'ять	32 Кб
Оперативна пам'ять (RAM)	2 Кб
EEPROM	1 Кб
Тактова частота	16 МГц
Розміри плати	68,6 мм x 53,4 мм

### 2.2.2 Аналіз сервоприводів та електронних компонентів

В даній роботі для управління рухами роботизованої руки використовуються сервоприводи MG996R та SG90, які забезпечують точне позиціонування та контроль різних осей. Для забезпечення стабільного функціонування роботизованої руки необхідно провести детальний аналіз характеристик сервоприводів та підключених електронних компонентів.

Сервоприводи MG996R та SG90 (рис. 2.5) є основними виконавчими елементами в системі управління роботизованою рукою. Вони використовуються для переміщення кожної з осей руки.

MG996R – це серво з високим крутним моментом, що ідеально підходить для виконання важких механічних робіт в межах великого робочого діапазону.



Рисунок 2.5 – Сервопривод MG996R [14]

Крутний момент цього сервоприводу досягає 9,4 кг·см при напрузі 4,8 В, що забезпечує достатню силу для переміщення плеча та ліктя маніпулятора.

Основні технічні характеристики пристрою такі:

- напруга живлення становить від 4,8 до 6,0 В;
- крутний момент досягає 9,4 кг·см (при 4,8 В);
- час ходу становить від 0,20 до 0,25 секунди на 60°;

SG90 – це малогабаритний серво (рис. 2.6), що зазвичай використовується для управління меншими компонентами, такими як кисть руки або фіксація деталей.



Рисунок 2.6 – Сервопривод SG90 [15]

Це сервопривод з меншим крутним моментом, що підходить для легших осей роботизованої руки.

- напруга живлення: 4,8 – 6,0 В;
- крутний момент: 1,8 кг·см при 4,8 В;
- час ходу: 0,1 – 0,12 с на 60°;

HC-05 Bluetooth модуль (рис. 2.7) для бездротового управління роботизованою рукою використовуємо модуль HC-05, який забезпечує зв'язок між Arduino та мобільним додатком через Bluetooth.



Рисунок 2.7 – HC-05 Bluetooth модуль [16]

Цей модуль дозволяє здійснювати двосторонній обмін даними, що необхідно для передачі команд на кожен з сервоприводів.

- напруга живлення: 3,3–6 В;
- швидкість передачі даних: 9600 бод;
- інтерфейс: серійний (UART).

Arduino UNO Як центральний контролер в системі використовується Arduino UNO. Ця плата забезпечує управління всіма сервоприводами через цифрові виходи та дозволяє інтегрувати Bluetooth модуль для отримання команд від користувача. Arduino UNO має достатньо цифрових пінів для підключення 6 сервоприводів, що використовуються в проекті.

Важливі характеристики:

- мікроконтролер: ATmega328P;
- число цифрових входів/виходів: 14;
- число аналогових входів: 6;

– частота роботи: 16 МГц.

Для забезпечення належної роботи всієї системи необхідно використовувати зовнішнє джерело живлення, здатне забезпечити необхідний струм для сервоприводів.

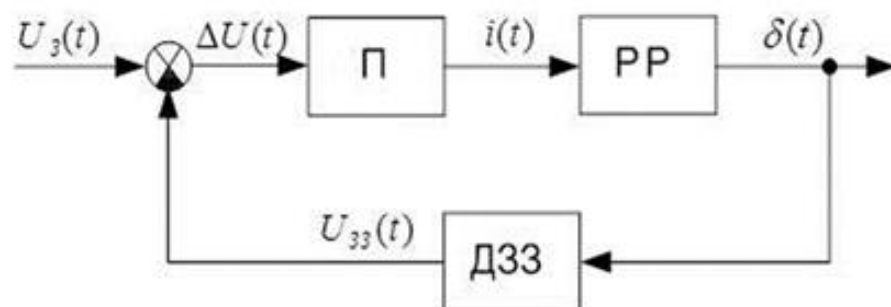
Сервоприводи, як правило, споживають більше енергії, ніж може забезпечити плата Arduino, тому для них потрібно використовувати окремий блок живлення з вихідною напругою 5 В та здатністю витримувати струм до 2 А.

Основні характеристики системи:

- кількість сервоприводів: 6 (3 великих MG996R та 3 малих SG90);
- споживана потужність: залежить від навантаження на сервоприводи, середнє значення – до 2 А;
- інтерфейс зв'язку: Bluetooth (HC-05);
- живлення: 5 В (через зовнішнє джерело живлення).

### 2.3 Дослідження роботи сервоприводу та його позиціонування

Для вивчення динаміки роботи сервоприводу запропонована його функціональна схема (рис. 2.8) [17].



П – плата (драйвер); РМ – роботизована рука; ДЗЗ – датчик зворотного зв'язку;  $i(t)$  – струм управління;  $U_{33}(t)$  – струм зворотного зв'язку;  $U_3(t)$  – командний струм;  $\Delta U(t)$  – результуючий струм;  $\delta(t)$  – поворот вихідного валу

Рисунок 2.8 – Функціональна схема сервоприводу [17]

Підсилювач сервоприводу (ПСП) – це підсилювач потужності, який є малоінерційним ланкою [17]. Його передавальна функція має вигляд:

$$W_{ПСП} = \frac{\delta(s)}{a_{я}(s)} = \frac{K_{П}}{1+T_{П}s}. \quad (2.1)$$

Зазвичай ця функція має малу величину [17]. Передавальну функцію ПСП приблизно можна записати як:

$$W_{ПСП} \approx K_{П}, \quad (2.2)$$

де  $K_{П}$  – коефіцієнт посилення підсилювача по потужності.

Сервопривід перетворює енергію від ПСП в механічну енергію. Сервопривід є інтегральним ланкою, тобто при подачі сигналу на вхід на виході виходить постійна швидкість переміщення (кутова швидкість) [18].

Щоб обертати вал, сервопривод повинен генерувати крутний момент, що перевищує суму моментів, які навантажують вихідний вал. Такими моментами є:

- $M_{інерц.}$  – інерційний;
- $M_{демпф}$  – демпфуючий;
- $M_{шарн.}$  – шарнірний;
- $M_{a1}$  – момент асиметрії який визначається неспівпаданням ліній дії сили тяги  $r\delta$  і осі підвісу;
- $M_{a2}$  – момент асиметрії який визначається неспівпаданням ліній сили інерції і осі підвісу;
- $M_{тер}$  – момент сил сухого тертя.

Таким чином, рушійний момент  $M_{руш}$  врівноважують моментами навантажень:

$$M_{руш} = M_{інерц} + M_{демп} + M_{шарн} + M_{a1} + M_{a2} + M_{тер}. \quad (2.3)$$

Для вивчення динамічних процесів сервопривід представлений у вигляді динамічної ланки, тобто електромеханічного перетворювача (ЕП) з рухомим елементом якорем [19]. Передавальна функція сервоприводу  $W_{СП}(S)$  має вигляд:

$$W_{СП}(S) = W_{ЕП}(S), \quad (2.4)$$

де  $W_{ЕП}(S)$  – передавальна функція електромеханічного перетворювача.

Передавальну функцію  $W_{СП}(S)$  електромеханічного перетворювача можна одержати з рівняння руху якоря:

$$I_{я} \cdot \ddot{\alpha}_{я} + B \cdot \dot{\alpha}_{я} + C \alpha_{я} = M_E = K \cdot I_{У}. \quad (2.5)$$

Рівняння (2.5) в стандартній операторній формі матиме вигляд:

$$(I_{я} \cdot s^2 + B \cdot s + C) \cdot \alpha_{я} = K \cdot I_{У}, \quad (2.6)$$

де  $I_{я}$  – приведений момент інерції якоря;

$B$  – коефіцієнт електромагнітного демпфування і демпфуючих властивостей середовища, в якому переміщається якір;

$C$  – жорсткість пружного елемента якоря;

$I_{У}$  – управляючий струм якоря (вхідна дія);

$\alpha_{я}$  – кут повороту якоря (вихідний параметр ланки);

$K$  – коефіцієнт пропорційності, що характеризує залежність між струмом управління і електромагнітним моментом.

З рівняння (2.2) виходить передавальна функція електромеханічного перетворювача (ЕП):

$$W_{EP} = \frac{\alpha_{я}(s)}{I_{II}(s)} = \frac{K_{EP}}{T_{я}^2 \cdot s^2 + 2\xi T_{я} s + 1}, \quad (2.7)$$

де  $K_{EP} = K/C$  – статичний коефіцієнт передачі ЕП;

$$T_{я} = \sqrt{\frac{I_{я}}{C}} \quad \text{– постійна часу};$$

$$\xi = \frac{B}{2 \cdot C \cdot T_{я}} = \frac{B}{2 \cdot I_{я} \sqrt{C}} \quad \text{– ступінь заспокоєння якоря}.$$

Індуктивний датчик (ІД) або різниці потенціалів РД використовується як датчик зворотного зв'язку (33). Якщо датчик зворотного зв'язку є потенціометром, то в ньому є резистор [19]. З 33 сигнал надходить на суматор ПСП. Якщо датчик індуктивний, він повинен мати фазочутливий випрямляч ФЧВ і резистор [20-21]. Датчик різниці потенціалів простий в конструкції, але має недоліки, пов'язані з ковзаючим контактом і ступінчастими характеристиками, які обмежують його використання.

Для оцінки динамічних характеристик сервоприводу модульної робототехнічної системи було підставлено типові значення параметрів, характерних для малогабаритних сервомоторів, таких як MG996R або SG90, які застосовуються в даному проекті:

- приведений момент інерції якоря:  $I_{я} = 0,00002 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;
- коефіцієнт демпфування:  $B = 0,001 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{радВ}$ ;
- жорсткість пружного елемента:  $C = 0,1 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$ ;

коефіцієнт між струмом управління і моментом:  $K = 0,05 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{А}$ ;

На основі цих значень було розраховано:

- статичний коефіцієнт передачі:  $K_{EP} = 0,5$ ;
- постійна часу якоря:  $T_{я} = 0,014 \text{ с}$ ;
- ступінь заспокоєння:  $\xi = 0,35$ ;

Після підстановки у передавальну функцію електромеханічного перетворювача (формула 2.7), отримано:

$$W_{EP} = \frac{0,5}{0,00002 \cdot s^2 + 0,0098 \cdot s + 1}, \quad (2.8)$$

Ця функція може бути використана для моделювання динамічної відповіді сервоприводу у середовищах MATLAB/Simulink або інших інструментах аналізу систем управління.

## 2.4 Висновки до розділу

У результаті виконаної роботи було проведено всебічний аналіз предметної області, пов'язаної з проектуванням робототехнічних систем виробничого призначення. Описано сучасні наукові підходи, розглянуто типові технічні рішення та систематизовано інформацію щодо ключових принципів побудови модульних робототехнічних комплексів.

Особливу увагу приділено вивченню характеристик та функціонального призначення виконавчих елементів, таких як захватні пристрої та серводвигуни. Було досліджено технічні вимоги до систем керування та взаємодії між апаратною і програмною складовими. Проведено аналіз переваг модульного підходу, який дозволяє адаптувати систему до різних умов експлуатації та виробничих задач.

Сформовано структурну схему майбутньої робототехнічної системи, що ляже в основу наступних етапів розробки. Також визначено основні апаратні компоненти, необхідні для реалізації проєкту, а також принципи їх взаємодії з програмним забезпеченням.

Отримані результати заклали основу для подальшого проєктування і реалізації прототипу. Наступним кроком є вибір конкретної елементної бази, написання керуючого програмного забезпечення, складання фізичного макета системи та його тестування у лабораторних умовах.

## 3 ПРОЄКТУВАННЯ МОДУЛЬНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВИРОБНИЧОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

### 3.1 Розробка загальної структури робототехнічної системи

Розробка робототехнічної системи виробничого призначення вимагає системного підходу, що передбачає ретельне планування та моделювання її архітектури. На початковому етапі важливо сформулювати загальну структуру системи, визначити її основні складові елементи, логіку взаємодії між ними та принципи функціонування. Враховуючи швидкий розвиток технологій автоматизації, актуальним є застосування модульного підходу, що дозволяє створити гнучку, масштабовану та адаптивну систему.

Модульна структура дає можливість легко змінювати або оновлювати окремі компоненти системи без необхідності внесення кардинальних змін до її загальної архітектури. Це особливо важливо в умовах сучасного виробництва, де гнучкість і здатність швидко реагувати на зміну завдань є ключовими факторами успіху. Модулі можуть бути як апаратними (наприклад, різні типи сенсорів, маніпуляторів, виконавчих пристроїв), так і програмними (алгоритми обробки даних, інтерфейси, засоби управління).

Під час розробки загальної структури враховувалися наступні основні вимоги (рис. 3.1):

- гнучкість і можливість адаптації до різних виробничих процесів;
- простота технічного обслуговування та оновлення;
- модульність, що дозволяє комбінувати різні компоненти;
- підтримка стандартних інтерфейсів для забезпечення сумісності;
- ефективність у роботі та надійність у складних виробничих умовах.

На основі аналізу технічних вимог, особливостей експлуатації та типових сценаріїв використання була сформована загальна структура системи. Вона

враховує усі ключові аспекти функціонування сучасної виробничої робототехнічної установки.

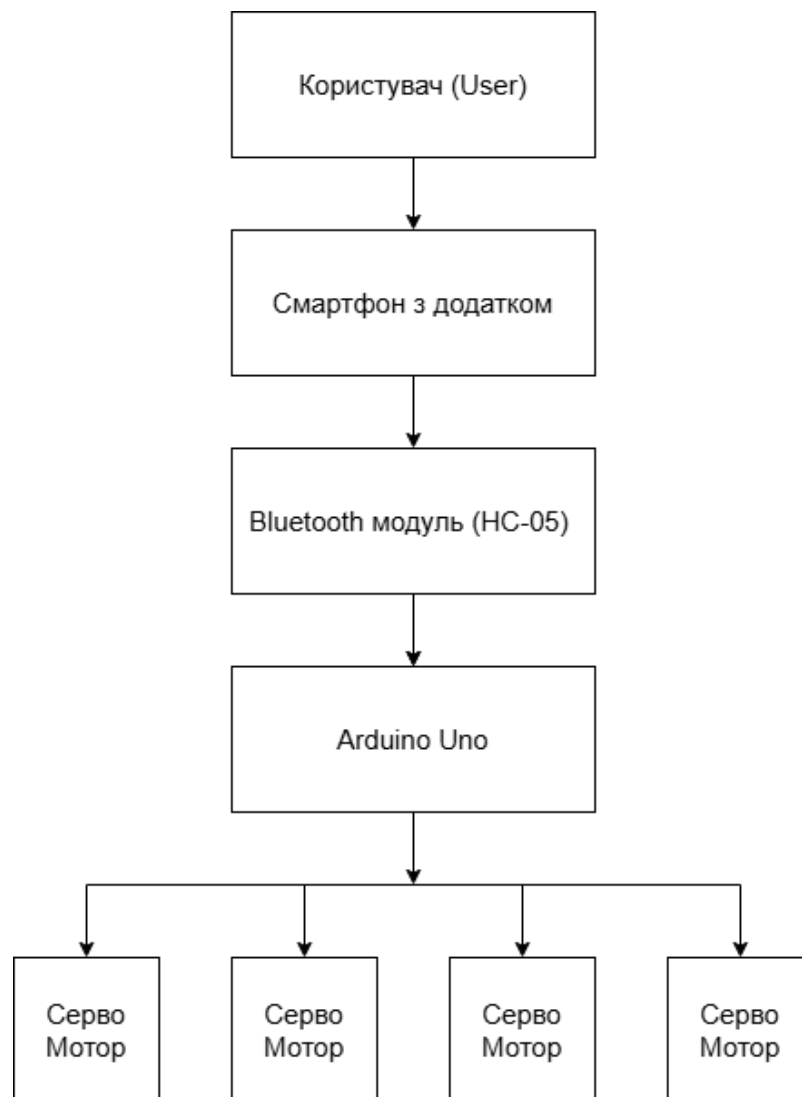


Рисунок 3.1 – Загальна структура модульної робототехнічної системи

Система складається з кількох функціональних блоків, кожен з яких виконує специфічні завдання:

- маніпуляторний модуль, основна роль якого – виконання фізичних дій: переміщення деталей, захоплення, збирання та інші операції;
- сенсорний модуль, що включає різні типи датчиків (положення, сили, температури, вібрації, освітлення) та забезпечує систему актуальною інформацією про навколишнє середовище;

- обчислювальний модуль, який виступає як «мозок» системи – обробляє сигнали, приймає рішення, реалізує логіку управління;
- модуль живлення та зв'язку, що відповідає за стабільне живлення сервомоторів, сенсорів, а також забезпечує обмін даними між компонентами;
- інтерфейс людино-машина (НМІ), за допомогою якого оператор має змогу контролювати систему, змінювати параметри, запускати або зупиняти процеси.

Кожен із цих модулів має чітко визначені функції, але водночас їхня взаємодія забезпечує узгоджену роботу всієї системи. Такий підхід дозволяє не лише реалізувати поточні завдання, а й забезпечити перспективу подальшого розвитку та вдосконалення системи.

Для розуміння функціональної взаємодії між модулями було побудовано контекстну діаграму за методологією IDEF0 (рис. 3.2). Вона дозволяє візуалізувати загальний процес управління, ідентифікувати основні потоки вхідних та вихідних даних, управлінських сигналів та механізмів реалізації.

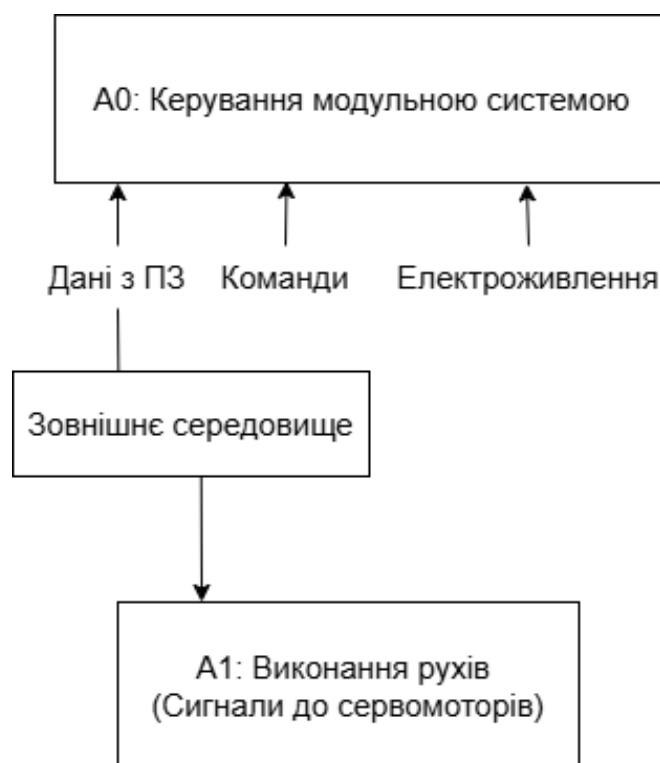


Рисунок 3.2 – Контекстна діаграма робототехнічної системи (IDEF0)

На діаграмі робототехнічна система зображена як сукупність взаємопов'язаних функцій, що працюють у контексті вхідних виробничих даних, програмного забезпечення та зовнішніх сенсорних впливів. Вона отримує інформацію, аналізує її, приймає рішення і виконує необхідні фізичні дії.

Деталізація функціональних блоків була виконана шляхом декомпозиції, що дозволяє представити систему у вигляді логічно структурованої ієрархії процесів (рис. 3.3). Такий підхід є надзвичайно ефективним для подальшої розробки програмного забезпечення, тестування та оптимізації.



Рисунок 3.3 – Декомпозиція функцій робототехнічної системи

На рисунку представлено розбиття основної функціональної задачі на підзадачі: збір даних із сенсорів, попередня обробка, аналіз, генерація керуючих сигналів, виконання дій та контроль зворотного зв'язку. Це дозволяє чітко зрозуміти логіку управління системою на кожному етапі її роботи.

Додатково для відображення потоків даних у системі використано DFD-діаграму (рис. 3.4). Вона дозволяє виявити, як і куди переміщується інформація, які компоненти її обробляють, де можливі затримки або дублювання.

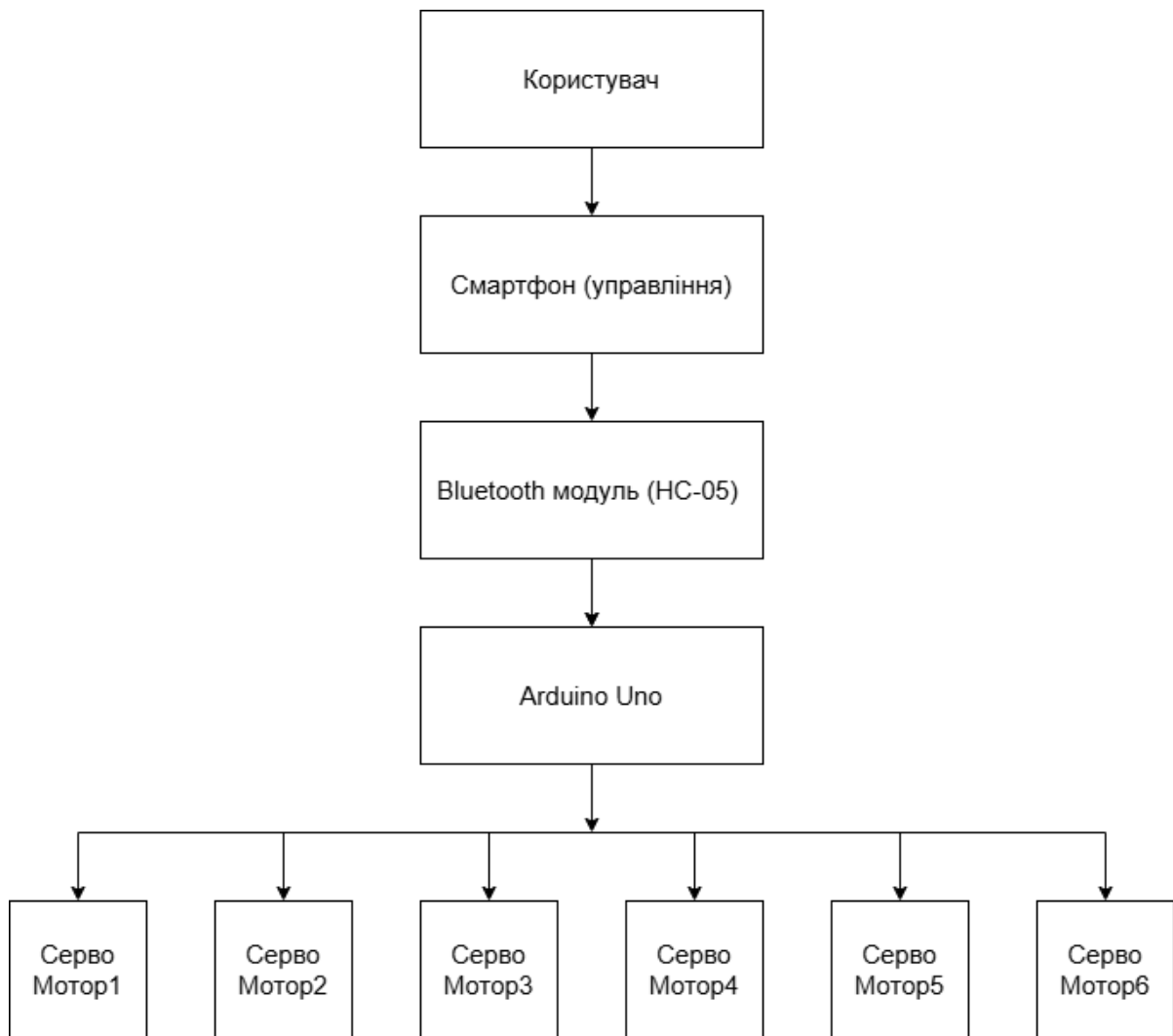


Рисунок 3.4 – DFD діаграма модульної робототехнічної системи

DFD-діаграма демонструє основні логічні зв'язки та інформаційні потоки між компонентами: від надходження сигналу з датчика до передачі команди на виконавчий механізм. Вона є ефективним інструментом для перевірки цілісності архітектури системи та оптимізації обміну інформацією.

Застосування такого підходу дозволяє не лише досягти високої продуктивності, а й забезпечити надійність, безпеку та легкість масштабування. Модульна структура також сприяє швидкій заміні або оновленню окремих елементів системи без порушення її загального функціонування.

Таким чином, побудована структура модульної робототехнічної системи є результатом ретельного аналізу, технічного проектування та інтеграції

сучасних технологій. Вона відповідає потребам інноваційного виробництва та забезпечує високу гнучкість, адаптивність і ефективність у роботі.

### 3.2 Обґрунтування вибору принципу модульності

У сучасних умовах інтенсивного розвитку промислових технологій і зростаючих вимог до гнучкості та адаптивності виробничого обладнання, дедалі більшої актуальності набуває модульний підхід до проектування технічних систем, зокрема робототехнічних. Принцип модульності передбачає побудову системи з незалежних, стандартизованих функціональних блоків (модулів), кожен з яких виконує певну частину загального завдання, але може бути легко замінений, оновлений або перепризначений без потреби радикальних змін в архітектурі всієї системи.

Застосування модульного підходу при розробці робототехнічної системи виробничого призначення має ряд суттєвих переваг, які обґрунтовують його доцільність саме в рамках даного проекту. Одним із ключових факторів є гнучкість, тобто можливість легко адаптувати систему до нових задач, умов експлуатації або конфігурацій без суттєвих витрат часу й ресурсів. Наприклад, при зміні виробничої лінії або завдань (збирання, сортування, пакування тощо), достатньо замінити окремі модулі (маніпулятор, датчики або програмне забезпечення) без потреби перепроєктування всієї системи.

Ще однією важливою перевагою є масштабованість. Завдяки модульності, систему можна легко розширити, додавши нові функціональні блоки: другий маніпулятор, додатковий сенсорний модуль або нову обчислювальну платформу. Такий підхід забезпечує поступове нарощування функціональності без зниження ефективності основного комплексу.

Крім того, обслуговування та модернізація модульної системи значно спрощуються. У разі виходу з ладу певного модуля або необхідності оновлення прошивки чи обладнання, можна виконати заміну лише цього елемента без втручання в інші частини системи. Це суттєво знижує витрати на технічне

обслуговування, простої та загальні витрати життєвого циклу системи.

У рамках цього проєкту створюється роботизована система на базі Arduino Robot Arm, яка вже сама по собі має модульну структуру: основний контролер (Arduino Uno або Mega), Bluetooth-модуль HC-05, сервоприводи для руху ланок маніпулятора, блок живлення, а також програмне забезпечення для управління через мобільний застосунок. Кожен з цих компонентів може бути замінений, модернізований або налаштований окремо, що повністю відповідає концепції модульності.

Інформаційно-функціональна структура, описана в попередньому розділі, чітко демонструє поділ системи на підсистеми: керування, виконавча, сенсорна, енергетична та інтерфейсна. Такий поділ є не лише логічним, але й фізичним – з використанням окремих апаратних модулів та інтерфейсів між ними (наприклад, послідовні UART-з'єднання, I2C, або PWM-сигнали).

Важливим аргументом на користь модульності також є простота впровадження в навчальних, дослідницьких або малосерійних промислових умовах. Студенти, інженери або розробники можуть легко створювати прототипи, використовуючи готові модулі з відкритими специфікаціями (Arduino, датчики, серво, Bluetooth-модулі), комбінувати їх залежно від задачі, швидко тестувати рішення та вдосконалювати функціональність системи.

Також принцип модульності забезпечує зниження витрат на розробку та впровадження. Замість проектування складної інтегрованої системи, розробник може зібрати функціональну систему з існуючих компонентів, адаптованих до поставленого завдання. Наприклад, використання готового маніпулятора з сервомоторами дозволяє уникнути складного механічного проектування та зосередитись на розробці алгоритмів управління, що є пріоритетним у рамках цієї роботи.

Порівняльний аналіз підходів до побудови робототехнічних систем показує, що традиційний (інтегрований) підхід обмежує можливість змін або швидких оновлень, тоді як модульний – сприяє гнучкій адаптації, що особливо

важливо в умовах динамічного виробництва та постійного вдосконалення технічних засобів. У таблиці нижче наведено основні переваги модульного принципу порівняно з монолітним.

У результаті аналізу зроблено висновок, що саме принцип модульності є найбільш доцільним для реалізації робототехнічної системи, що розробляється в рамках цієї роботи. Він забезпечує:

- швидке налаштування і адаптацію до змін умов виробництва;
- легкість в експлуатації, обслуговуванні та оновленні;
- зниження витрат на реалізацію;
- підвищену надійність і функціональну незалежність блоків;
- масштабованість при потребі в розширенні системи в майбутньому [22].

### 3.3 Аналіз апаратної модульності: змінні захватні пристрої

У межах створення модульної робототехнічної системи надзвичайно важливим є аспект апаратної модульності, особливо в частині захватних пристроїв, які виконують функцію маніпуляції з об'єктами. Захватні пристрої є невід'ємним елементом більшості промислових роботів, адже саме вони забезпечують взаємодію маніпулятора з фізичними об'єктами в робочому середовищі. У запропонованій роботизованій системі реалізовано принцип змінності захватних модулів, що дозволяє швидко адаптувати робота до виконання різних виробничих завдань.

Початковий варіант маніпулятора було змодельовано в середовищі SolidWorks з урахуванням можливості легкого демонтажу та заміни захвату. У базовій конфігурації використано механічний гріпер, зібраний із 3D-друкованих компонентів, керованих за допомогою мікросервоприводу SG90. Він забезпечує базову функціональність – відкриття та закриття щелеп для утримання легких об'єктів. Такий захват оптимально підходить для демонстраційних задач, маніпуляцій з невеликими предметами, навчання та тестування системи.

Однак однією з ключових переваг створеної системи є можливість швидкої заміни цього механічного гріпера на інші типи захватних пристроїв. Серед альтернативних варіантів, які можуть бути реалізовані або вже протестовані в ході роботи над проектом, можна виділити такі:

- вакуумний захват – працює за принципом створення розрідження повітря, що дозволяє піднімати об'єкти з гладкою поверхнею. Такий модуль може бути легко підключений до наявної платформи, якщо додати невеликий вакуумний насос і реле для його керування;

- магнітний захват – дозволяє маніпулювати металевими об'єктами без потреби фізичного затискання. Це може бути як постійний магніт з електромагнітним керуванням, так і повноцінний електромагніт, який підключається через транзисторний ключ;

- адаптивний м'який захват (soft gripper) – перспективне рішення для роботи з делікатними або нестандартної форми об'єктами. Такі захвати виготовляються з силікону або TPU за допомогою 3D-друку і керуються пневматично або серводвигунами.

Усі ці варіанти можна реалізувати в межах одного механічного та електронного інтерфейсу завдяки модульному підходу до побудови апаратної частини. Захватний модуль підключається до останнього серводвигуна маніпулятора, при цьому забезпечено уніфікований спосіб кріплення через стандартний роз'єм або монтажну платформу. Такий підхід дозволяє здійснювати заміну захвата без необхідності демонтажу інших частин конструкції або перепрошивки мікроконтролера.

Ще одним аспектом, який враховувався при аналізі модульності захвату, є вагова та енергетична ефективність. Наприклад, мікросерво SG90 має обмежений крутний момент (~2,5 кг·см), тому маса гріпера та об'єкта повинна бути оптимальною. Для більш складних або вантажних задач можна замінити сервопривід на потужніший, наприклад MG996R, або реалізувати силову передачу через редуктор.

Таким чином, модульність захватного пристрою забезпечує гнучкість системи, її адаптованість до різних виробничих процесів та експериментальних сценаріїв. Це особливо важливо в умовах швидкоплинних вимог промисловості, де одна й та сама роботизована система може виконувати різні функції в залежності від потреб.

У подальшій розробці передбачається створення уніфікованого адаптера для підключення різних захватних модулів до маніпулятора, а також тестування їхньої сумісності з програмним забезпеченням керування, реалізованим на базі Arduino і Bluetooth-комунікації зі смартфоном.

### 3.4 Програмна модульність: розробка адаптивного програмного забезпечення

У сучасній робототехнічній практиці [23] ефективність і гнучкість програмного забезпечення визначаються здебільшого його архітектурною побудовою. Це особливо важливо в умовах швидкого розвитку технологій та постійної потреби у вдосконаленні виробничих процесів. З огляду на це, при розробці запропонованої роботизованої системи було обрано модульний підхід до побудови програмної частини. Модульна архітектура дозволяє розбити комплексну систему на набір відносно незалежних функціональних блоків, кожен з яких реалізує певну частину загальної логіки. Такий підхід забезпечує зручність в обслуговуванні, розширюваність та можливість гнучкої адаптації до нових задач без потреби повної перебудови всієї системи.

Згідно з реалізованим підходом, програмне забезпечення системи поділено на кілька рівнів, які взаємодіють між собою через стандартизовані інтерфейси. Перший рівень представлений користувацьким інтерфейсом, що реалізований у вигляді мобільного застосунку. Цей застосунок був розроблений за допомогою середовища MIT App Inventor [24], яке дозволяє швидко створювати інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс. Через цей інтерфейс

користувач має змогу керувати рухами роботизованої руки, обираючи певні дії або положення, які мають бути досягнуті. Інформація про вибрані команди передається на наступний рівень за допомогою бездротового з'єднання – Bluetooth-зв'язку, що реалізується за допомогою модуля HC-05.

На другому рівні знаходиться мікроконтролер Arduino, який виконує роль центрального блоку керування. Отримуючи вхідні команди у вигляді текстових інструкцій або числових значень, Arduino здійснює їхню обробку та інтерпретацію.

Логіка, закладена у програмному коді, дозволяє розпізнавати кожен окрему команду та визначати, які саме серводвигуни потрібно активувати, а також які значення кута повороту задати. Таким чином, Arduino виступає в ролі "перекладача" між абстрактними командами користувача та фізичними діями роботизованої руки.

Останній, третій рівень представлений виконавчим механізмом – роботизованою рукою, конструкція якої включає кілька ступенів свободи, реалізованих за допомогою сервоприводів.

Кожен сервомотор відповідає за певний рух або положення одного з сегментів маніпулятора. Завдяки точному керуванню положенням сервоприводів система здатна виконувати базові маніпуляції, що можуть бути адаптовані під конкретні виробничі або демонстраційні задачі. Крім того, така структура дозволяє без значних змін у конструкції чи програмному коді реалізовувати нові сценарії взаємодії або змінювати поведінку системи в залежності від умов.

Таким чином, вся система функціонує як злагоджений механізм, де кожен модуль виконує свою частину роботи, а разом вони забезпечують точне й ефективно управління рухами роботизованої руки (рис. 3.5).

Подібна модульність є важливою перевагою, яка забезпечує як простоту розробки, так і гнучкість у масштабуванні чи модернізації проєкту в майбутньому.

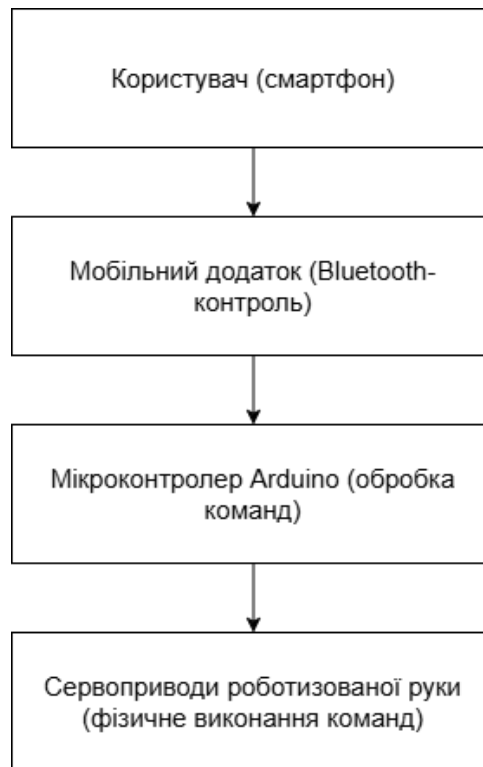


Рисунок 3.5 – Загальний алгоритм керування роботизованою рукою

Ключова перевага такої архітектури – адаптивність. Якщо, наприклад, зміниться тип сенсора або буде використана інша модель камери з відмінними технічними характеристиками (роздільна здатність, формат, інтерфейс тощо), достатньо буде модифікувати лише модуль захоплення зображення, не змінюючи решту логіки або загальний алгоритм. Це значно спрощує інтеграцію нових компонентів у вже існуюче середовище.

Аналогічно, при необхідності розширення кількості класифікованих об'єктів, наприклад, у разі переходу на новий асортимент продукції, не виникає потреби переписувати архітектуру чи алгоритми прийняття рішень.

Достатньо донавчити нейронну мережу, яка відповідає за ідентифікацію виробів, а всі інші модулі залишаються незмінними. Такий підхід зменшує витрати на розробку, мінімізує кількість помилок, пов'язаних з інтеграцією нових функцій, та робить систему гнучкою і масштабованою.

Більше того, модульна структура дозволяє проводити діагностику окремих частин системи незалежно одна від одної. Наприклад, якщо

виявляються проблеми з обробкою зображення, можна тимчасово замінити цей модуль на тестову версію, не зачіпаючи решту програмного забезпечення. Це спрощує налагодження та тестування системи як у лабораторних, так і в промислових умовах.

Другий приклад схеми показує, як виглядає структура викликів і взаємодії між програмними модулями у вигляді потоку команд у реальному часі (рис. 3.6).

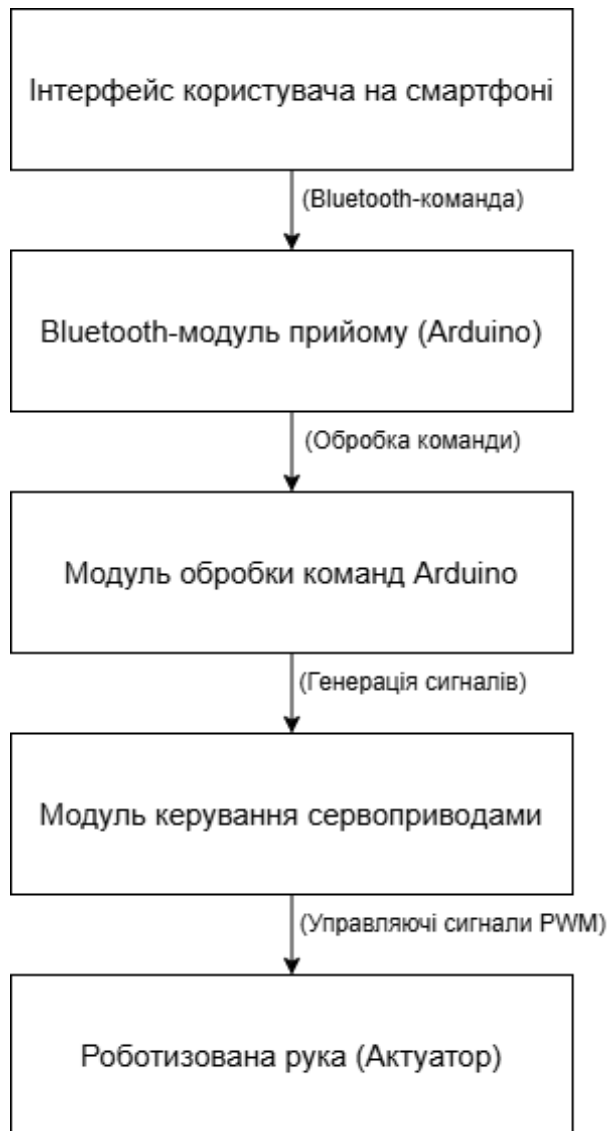


Рисунок 3.6 – Послідовність обміну даними між програмними модулями під час керування роботизованою рукою через Bluetooth-з'єднання

У робототехнічних системах важливим аспектом є не лише передача даних між компонентами, а й активна взаємодія програмних модулів. Кожен

модуль не лише отримує інформацію, але й активно обробляє запити, чекає на підтвердження, а деякі з них здійснюють повторні перевірки результатів.

Такий підхід є характерним для реальних систем, де між отриманням сигналу, його обробкою та відповідною реакцією повинно пройти мінімум часу. Цей аспект є критично важливим для робототехнічних систем, зокрема в умовах виробничих процесів, де навіть найменші затримки можуть призвести до порушення роботи або аварійних ситуацій.

У даній роботі програмні модулі взаємодіють не тільки через передавання даних, але й через події, ініційовані іншими компонентами, що забезпечує цілісність і правильність функціонування всієї системи. Наприклад, після отримання зображення модуль обробки негайно передає його до етапу аналізу нейронною мережею. Після класифікації об'єкта, нейронна мережа передає дані модулю прийняття рішень, а той, у разі потреби, ініціює команду до модуля керування маніпулятором.

Для керування роботизованою рукою було використано спеціалізований Android-застосунок Arduino Robot Arm Control, що є зручним і ефективним інтерфейсом для взаємодії з системою. Цей застосунок забезпечує передачу команд до мікроконтролера Arduino через Bluetooth-з'єднання в режимі реального часу, дозволяючи гнучко налаштовувати та керувати всіма ступенями свободи роботизованої руки (рис. 3.7).

На зображенні (рис. 3.7) наведено головний екран застосунку, де користувач має доступ до слайдерів (повзунків), кожен із яких відповідає за один з приводів або параметрів:

- Grip (Захват) – керує змиканням та розмиканням захоплювача;
- Wrist Pitch (Нахил зап'ястка) – контролює нахил зап'ястка вверх-вниз;
- Wrist Roll (Поворот зап'ястка) – відповідає за обертання зап'ястка навколо осі;
- Elbow (Лікоть) – забезпечує згинання/розгинання ліктя;
- Shoulder (Плече) – керує рухом руки в області плеча;

- Waist (Талія) – здійснює поворот у горизонтальній площині;
- Speed (Швидкість) – регулює загальну швидкість виконання команд.

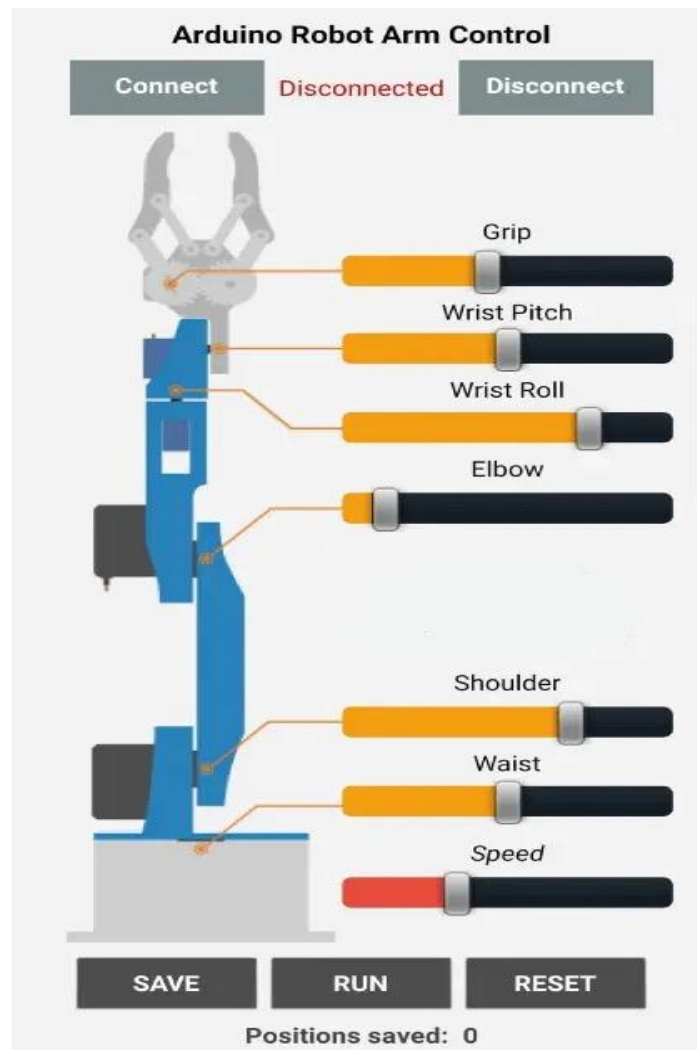


Рисунок 3.7 – Графічний інтерфейс Android-застосунку для керування роботизованою рукою

Кожен рух задається відповідним значенням кута (зазвичай у діапазоні від 0 до 180 градусів), яке передається на Arduino. Таким чином, уся механіка контролюється набором числових значень, що задають положення сервомоторів.

На додаток до слайдерів застосунок містить низку кнопок:

- Connect / Disconnect – керують з'єднанням із Bluetooth-модулем (наприклад, HC-05 або HC-06), що з'єднаний з Arduino;

– SAVE – дозволяє зберегти поточні позиції всіх приводів для подальшого автоматичного відтворення;

– RUN – запускає збережену послідовність рухів у циклічному або одноразовому режимі;

– RESET – повертає всі серводвигуни в початкове положення (наприклад, калібрувальні значення).

Після переміщення будь-якого повзунка, застосунок формує символічний рядок із кутовими значеннями для кожного сервомотора та параметром швидкості. Цей рядок передається на Arduino через Bluetooth.

Наприклад, рядок:

<90, 45, 180, 100, 130, 60, 120>

означає значення для Grip, Wrist Pitch, Wrist Roll, Elbow, Shoulder, Waist і Speed відповідно.

Arduino зчитує дані з Bluetooth-модуля, аналізує отриманий рядок, і приводить у дію відповідні сервоприводи, змінюючи їхнє положення.

Таке мобільне рішення має низку переваг:

– можливість миттєвої зміни параметрів без перезавантаження програми;  
– візуальна індикація і простий інтерфейс роблять керування доступним навіть для користувачів без технічного досвіду;

– гнучке управління усіма ступенями свободи дозволяє швидко тестувати нові траєкторії або навчати систему новим сценаріям.

Одним із ключових елементів запропонованої робототехнічної системи є мобільний застосунок, який забезпечує інтуїтивне та ефективне керування рухами роботизованої руки. Застосунок було створено за допомогою візуального середовища MIT App Inventor [24], що дозволяє швидко розробляти Android-додатки без необхідності глибокого програмування. Цей підхід ідеально підходить для розробки простих, але функціональних інтерфейсів

управління робототехнічними пристроями.

На верхній частині інтерфейсу застосунку розташовані дві основні кнопки: Connect та Disconnect. Вони відповідають за встановлення та розрив з'єднання між смартфоном і модулем Bluetooth HC-05, який безпосередньо підключений до мікроконтролера Arduino. Після успішного з'єднання користувач отримує можливість повноцінно управляти рухами кожного окремого сервопривода.

Ліва частина екрану містить ілюстрацію самої роботизованої руки. Цей візуальний елемент не тільки додає зручності в орієнтації, але й підвищує загальну інтуїтивність керування. Поруч з кожною частиною зображення розташовано повзунк, який відповідає за управління конкретним ступенем свободи маніпулятора: затискачем (Grip), нахилом зап'ястя (Wrist Pitch), обертанням зап'ястя (Wrist Roll), ліктем (Elbow), плечем (Shoulder) та поворотом талії (Waist).

Усі повзунки мають індивідуальні діапазони значень, які були підібрані відповідно до конструктивних можливостей відповідних сервоприводів. Це дозволяє максимально точно відтворювати задані позиції без перевантаження механізмів.

Окрему увагу слід приділити нижній частині інтерфейсу, де розміщено три функціональні кнопки: SAVE, RUN та RESET.

Кнопка SAVE дозволяє зберігати поточну конфігурацію положень усіх приводів у пам'ять, фактично створюючи кроки для автоматизованого сценарію.

Кнопка RUN активує виконання збереженої послідовності рухів, тим самим перетворюючи маніпулятор із пристрою ручного керування на автоматичну систему.

Кнопка RESET повертає маніпулятор у початковий стан або скидає всі поточні налаштування.

Крім того, під функціональними кнопками розміщено інформаційне поле,

яке відображає загальну кількість збережених позицій. Це особливо корисно для формування циклічних дій маніпулятора – наприклад, для автоматизованого сортування чи обслуговування об'єктів на виробничій лінії.

Загалом, застосунок реалізує концепцію зручного і гнучкого засобу керування, який не потребує складного монтажу чи навичок програмування. Такий підхід повністю відповідає принципу модульності, закладеному в основу всього проекту.

Програмне забезпечення можна легко адаптувати до нових умов, додавати або прибирати функціональність, змінювати зовнішній вигляд інтерфейсу без суттєвих змін у логіці взаємодії з мікроконтролером (рис. 3.8).

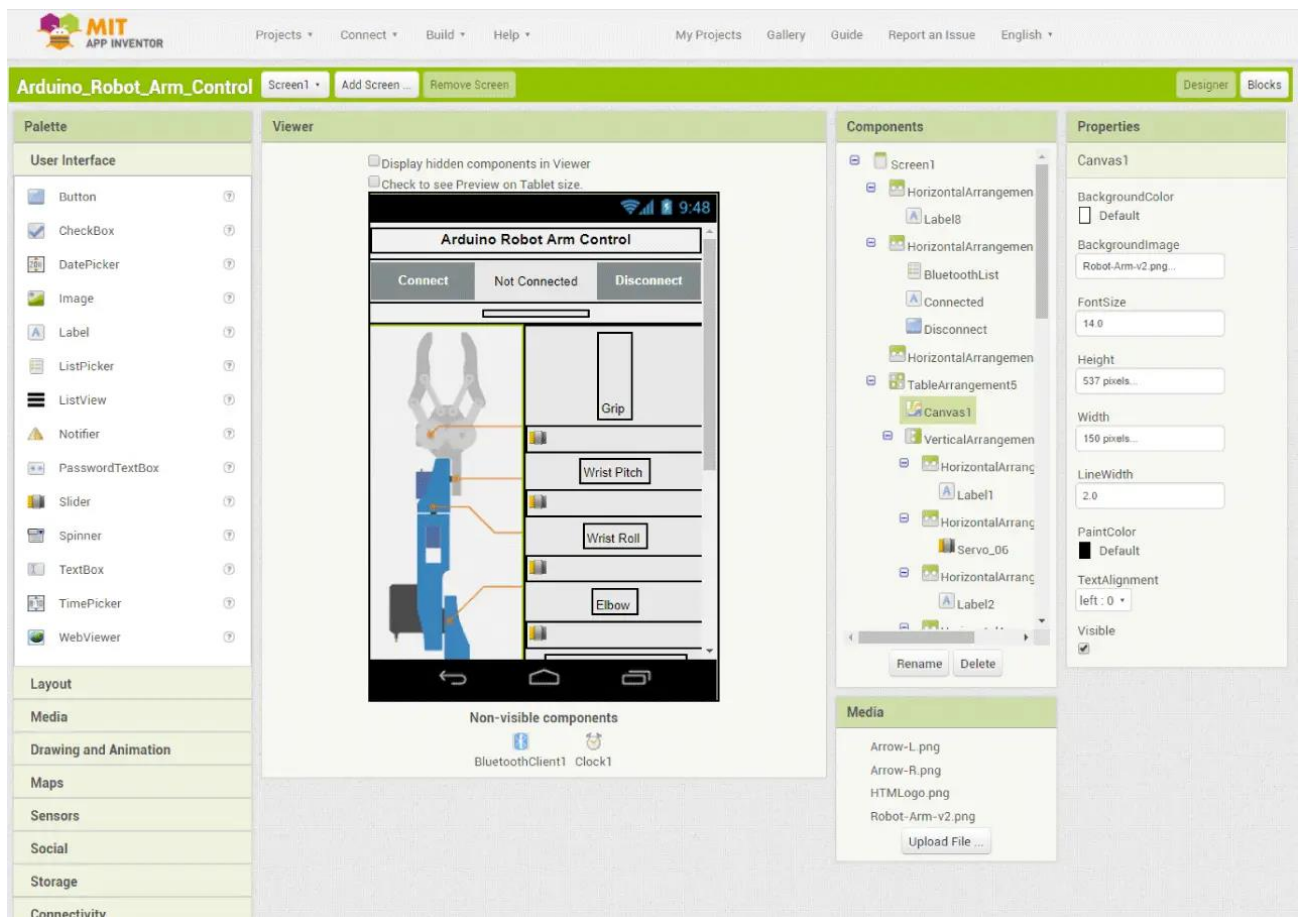


Рисунок 3.8 – Створення графічного інтерфейсу застосунку керування в середовищі MIT App Inventor [24]

Застосування мобільного інтерфейсу на базі MIT App Inventor [24] забезпечує гнучкий і зручний спосіб керування роботизованою рукою в реальному часі. Такий підхід дозволяє інтегрувати мобільні пристрої у виробничі процеси без потреби у складному та дорогому програмному забезпеченні. Варто зазначити, що завдяки графічному середовищу розробки, функціональність програми можна швидко змінювати – додавати нові елементи керування, перебудовувати логіку взаємодії або навіть адаптувати застосунок до інших типів маніпуляторів.

Таким чином, мобільний застосунок виступає як окремий програмний модуль системи, що підтверджує концепцію модульності на програмному рівні.

У випадку зміни вимог або впровадження нових апаратних модулів (наприклад, додаткових сервоприводів або сенсорів), достатньо змінити лише структуру та логіку відповідного застосунку без необхідності переписувати основний код мікроконтролера. Це суттєво прискорює оновлення, покращує масштабованість проекту та полегшує подальший супровід системи.

У поєднанні з іншими модулями – такими як програмне забезпечення Arduino, система зворотного зв'язку або нейромережеві алгоритми – мобільний застосунок виконує важливу роль у забезпеченні інтерактивності та гнучкості управління робототехнічною системою в умовах змінного виробничого середовища.

### 3.5 Висновки до розділу

У результаті виконаної роботи було сформовано комплексне бачення побудови ефективної робототехнічної системи з урахуванням сучасних вимог до адаптивності, надійності та універсальності. Проведено обґрунтований вибір принципу модульності, який дозволяє реалізувати конструктивну та функціональну гнучкість як у апаратній, так і в програмній складових системи.

Ретельно проаналізовано типові компоненти та технологічні рішення, що забезпечують змінність виконавчих модулів і адаптивність програмного

керування. Запропоновано архітектуру, яка забезпечує швидке налаштування системи під конкретні виробничі завдання без потреби повного перепроєктування.

Отримані результати є вагомим кроком у напрямку створення сучасного робототехнічного комплексу, придатного до масштабування, модернізації та подальшої інтеграції у виробничі процеси. Вони створюють надійну основу для наступних етапів реалізації проєкту та тестування працездатності системи в умовах, наближених до реальних.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Загальні положення

Охорона праці є важливою складовою будь-якої інженерної діяльності, особливо у сфері автоматизації та робототехніки. Вона охоплює комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на створення безпечних умов праці, збереження життя, здоров'я та працездатності учасників розробки. У рамках виконання кваліфікаційної роботи на тему «Розроблення робототехнічної системи виробничого призначення за принципом модульності» питання охорони праці включають дотримання вимог безпеки при проектуванні, збиранні, програмуванні та випробуванні роботизованої системи. Забезпечення безпеки повинно охоплювати як апаратну, так і програмну частину, включаючи всі етапи – від моделювання до практичної реалізації.

### 4.2 Небезпеки та шкідливі фактори

У процесі розробки модульної робототехнічної системи можуть виникати різноманітні небезпеки та шкідливі фактори. Електричні ризики пов'язані з можливістю ураження електричним струмом при підключенні або несправності елементів живлення та керування. Механічні небезпеки виникають через наявність рухомих частин, таких як серводвигуни або захватні механізми, які можуть спричинити травмування. Термічні загрози пов'язані з перегрівом електронних компонентів, що створює ризик опіків або пожежі. Хімічні фактори можуть з'являтися при використанні акумуляторів, які в разі пошкодження виділяють небезпечні випари або можуть вибухнути. Додатково слід враховувати вплив факторів навколишнього середовища – зокрема шум,

вібрації та електромагнітні випромінювання, що впливають на здоров'я виконавців [25].

#### 4.3 Заходи з охорони праці

Для створення безпечних умов праці під час реалізації роботизованої системи необхідно впроваджувати відповідні профілактичні заходи. Забезпечення електробезпеки досягається шляхом використання якісної ізоляції, запобіжників та автоматичних вимикачів, а також регулярного огляду стану електропроводки. Щоб уникнути механічних травм, конструкція системи повинна мати захисні кожухи на рухомих частинах і передбачати безпечний доступ до вузлів для обслуговування. Термічні ризики усуваються за рахунок систем охолодження та датчиків температури, які дозволяють автоматично вимикати систему при перегріванні [26]. Хімічну безпеку можна забезпечити використанням надійних акумуляторів, дотриманням умов зберігання та вентиляції приміщень, а також навчанням персоналу правилам поведінки з небезпечними речовинами [27]. Для зниження впливу шуму та електромагнітного випромінювання доцільно застосовувати шумопоглинаючі матеріали, екранування модулів і обмеження часу перебування поруч із працюючою системою [28 – 29].

#### 4.4 Пожежна безпека

Для запобігання пожежам необхідно передбачити наявність вогнегасників у місцях виконання робіт, а також оснащення приміщення системою пожежної сигналізації. Персонал має проходити регулярні інструктажі з пожежної безпеки та знати порядок дій у разі займання. Легкозаймісті матеріали повинні зберігатися в окремих, відповідним чином обладнаних зонах, згідно з вимогами пожежної безпеки [30 – 32].

#### 4.5 Санітарно-гігієнічні умови

Створення належних санітарно-гігієнічних умов праці є обов'язковим під час виконання проєкту. Робоче приміщення має бути добре вентильованим, щоб уникнути накопичення шкідливих парів або надмірного перегріву. Необхідно регулярно підтримувати чистоту на робочому місці, видаляти залишки пилу, дроту, деталей та інші відходи. Для персоналу має бути передбачене місце для відпочинку та прийому їжі, яке відповідає гігієнічним нормам [33 – 35].

#### 4.6 Висновки

Застосування комплексу заходів з охорони праці на всіх етапах розроблення модульної робототехнічної системи дозволяє забезпечити безпечні умови роботи, мінімізувати ризики виробничого травматизму, знизити ймовірність виникнення аварій та шкідливого впливу на навколишнє середовище. Правильна організація праці, використання відповідного обладнання, навчання персоналу та дотримання нормативних вимог створюють умови для ефективної, надійної та безпечної реалізації інженерного проєкту.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено комплексне дослідження в галузі проектування робототехнічних систем, зосереджене на використанні модульного підходу як основи для створення гнучкої та масштабованої виробничої платформи. Робота охоплює повний цикл розробки – від аналізу предметної області до створення функціонального прототипу з апаратною і програмною реалізацією.

Першочергово було здійснено огляд сучасних рішень у сфері промислової робототехніки, що дозволило виявити актуальні проблеми та визначити доцільність використання модульності як ключового принципу побудови систем. Було проаналізовано конструктивні рішення, типові конфігурації та взаємодію між виконавчими та керуючими компонентами.

У межах проекту було розроблено структурну схему модульної робототехнічної системи, що передбачає можливість швидкої заміни окремих функціональних блоків без порушення цілісності системи. Особлива увага приділялася змінним захватним пристроям, які є основним елементом адаптації системи під різні виробничі завдання.

Також було реалізовано програмне забезпечення для управління системою з використанням Bluetooth-з'єднання та мобільного застосунку. Програмна частина створена з урахуванням вимог до гнучкості, масштабованості та простоти налаштування. Було забезпечено підтримку збереження і повторення позицій, що дозволяє реалізовувати різні сценарії роботи без необхідності повторного програмування.

Зібраний лабораторний макет пройшов первинне тестування, у результаті чого була підтверджена працездатність основних функцій. Отримані результати демонструють ефективність запропонованих технічних рішень та доцільність використання модульного принципу для побудови виробничих

робототехнічних систем.

Розроблена система може бути використана як основа для подальших досліджень, а також як навчальний або демонстраційний стенд. Вона демонструє потенціал модульних підходів для підвищення адаптивності та ефективності робототехнічних рішень у виробничій сфері. Отримані практичні та теоретичні результати підтверджують успішність виконаної роботи та її актуальність у контексті сучасних інженерних задач.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ВЕАМ робототехніка [Електронний ресурс] : Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В. В. Євсєєв, С. С. Максимова ; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки, кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР). Харків : Видавець Чернявський Д. О., 2024. 276 с.
2. Sotnik S. V. Analysis of design process of automated fire protection system / S. V. Sotnik, Y. R. Vasylychenko // Automation, electronics and robotics (AERT-2023). 2023. P. 59-62.
3. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
4. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В. Токарева, А.І. Бронніков. Харків: ХНУРЕ, 2023. 65 с.
5. Положення про протидію академічному плагіату в ХНУРЕ [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 31.12.2024 р. № 386. Режим доступу: [https://nure.ua/wp-content/uploads/Main\\_Docs\\_NURE/386\\_31.12.2024.pdf](https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/386_31.12.2024.pdf)
6. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. 151 с.
7. Робототехнічні системи: проектування і моделювання [Електронний ресурс]: навч. Посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» /М. М. Поліщук, М.М. Ткач. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.

112 с.

8. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: монографія /І. Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, В. В.Євсєєв, С. П. Новоселов, Н. П. Демська. Х. :, 2022. 427 с.

9. Проць Я. І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: Навчальний посібник./ Я.І. Проць. Тернопіль : Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2008. 232 с.

10. Comparing 6-Axis and 4-Axis Robotics [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www](http://www) / URL: <https://goabco.com/blog/comparing-6-axis-and-4-axis-robotics>

11. UNIVERSAL-ROBOTS [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www](http://www) /URL:<https://www.universal-robots.com/marketplace/products/01tP400000710aYI/>

12. MAXON [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www](http://www) / URL: <https://www.maxongroup.com/en-gb/knowledge-and-support/blog>

13. UFACTORY [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www](http://www) / URL: <https://www.ufactory.cc>.

14. SmartElements [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www](http://www) / URL: <https://smartelements.ru/collection/motory-dravery-shassi/product/servoprivod-tower>

15. ThePiHut [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www](http://www) / URL: <https://thepihut.com/products/towerpro-servo-motor-sg90-digital>

16. Amazon [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www](http://www) / URL: <https://www.amazon.com/HiLetgo-Wireless-Bluetooth-Transceiver-Arduino/dp/>

17. Теорія автоматичного управління (збірник задач): навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарева. Харків: ХНУРЕ, 2020. 240 с.

18. Невлюдов І. Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 1: Підручник Харків: ФОП Панов А. М., 2021., 604 с.

19. Невлюдов І. Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 2: Підручник Кривий Ріг: видавець

Чернявський Д. О., 2022. 424 с

20. Nguyen, H. D., Vu, X. S., & Le, D. T. (2021, May). Modular graph transformer networks for multi-label image classification. In *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence* (Vol. 35, No. 10, pp. 9092-9100)

21. Li, H., Wang, H., Cui, L., Li, J., Wei, Q., & Xia, J. (2022). Design and experiments of a compact self-assembling mobile modular robot with joint actuation and onboard visual-based perception. *Applied Sciences*, 12(6), 3050

22. Liang, G., Luo, H., Li, M., Qian, H., & Lam, T. L. (2020, October). Freebot: A freeform modular self-reconfigurable robot with arbitrary connection point-design and implementation. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 6506-6513). IEEE

23. Parada, I., Sacristán, V., & Silveira, R. I. (2021). A new meta-module design for efficient reconfiguration of modular robots. *Autonomous robots*, 45(4), 457-472.

24. MIT APP INVENTOR [Електронний ресурс] /– Режим доступу: [www / URL: https://appinventor.mit.edu/](http://www.url: https://appinventor.mit.edu/)

25. ДСТУ EN 50110-1:2014 «Експлуатація електроустановок»

26. ДСТУ ISO 13857:2016 «Безпека машин. Захисні пристрої»

27. ДСТУ EN 60519-1:2019 «Безпека електротермічних установок»

28. ДСТУ EN 689:2018 «Атмосфера робочої зони. Вимірювання небезпечних речовин»

29. ДСТУ EN 12464-1:2017 «Освітлення робочих місць»

30. ДСТУ EN 3-7:2016 «Портативні вогнегасники»

31. ДСТУ ISO 45001:2019 «Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці»

32. ДСТУ EN 13501-1:2016 «Класифікація за реакцією на вогонь»

33. ДСТУ EN 13779:2012 «Вентиляція в будівлях»

34. ДСТУ EN 60335-2-69:2016 «Електропобутові та аналогічні прилади»

35. ДСТУ EN ISO 45001:2018 «Системи менеджменту гігієни та безпеки праці»