

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка системи керування трьохосьовим роботом маніпулятором

Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

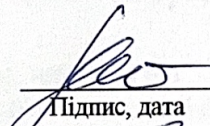
Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
4 курсу групи РМ-21-1


Підпис

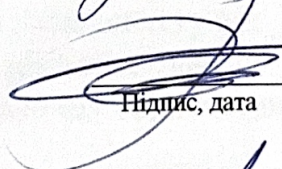
Хрущ І.І.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

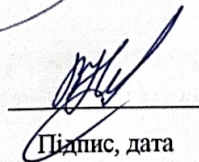
д.т.н., проф. Скиба М.Є.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

О.Т. Тимошук
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

к.т.н., доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

2 06 2025 р.

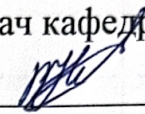
Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень бакалавр
Галузь знань 13 Механічна інженерія
Спеціальність 131 «Галузеве машинобудування»
Освітня програма Робототехнічні та мехатронні системи галузі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС



2 . 06 . 2025

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Хрущ Ілля Ігорович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка системи керування трьохосьовим роботом маніпулятором**

керівник роботи **Скиба М.Є., д.т.н, професор**

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи: **технічні характеристики трьохосьових роботів маніпуляторів аналогів**

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

1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи

2 Розробка електричної частини робота-маніпулятора

3 Розробка системи керування трьохосьовим роботом маніпулятором

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Аркуш 1. Пристрої з платою Arduino для керування. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Модель конструкції робота маніпулятора.

Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 3. Робот маніпулятор. Розрахунки (A2)+Елементи системи керування. Документ ілюстраційний (A2).

Аркуш 4. Схема підключення сервоприводів. Документ ілюстраційний (A2)+Підключення сервоприводів. Схема електрична (A2). Аркуш 5.

Блок-схема. Розрахунки (A2)+Програма керування. Документ

ілюстраційний (A2). Аркуш 6. Робот маніпулятор. Докуме
ілюстраційний (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

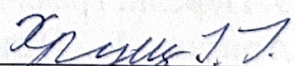
7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

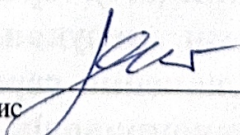
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	20.05.25р.	
2 Розробка електричної частини робота-маніпулятора	01.06.25р.	
3 Розробка системи керування трьохосьовим роботом маніпулятором	07.06.25р.	
4 Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	15.06.25р.	

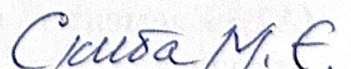
Студент


Підпис


Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис


Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

1. Прізвище, ім'я та по батькові **Хрущ Ілля Ігорович**

2. Тема бакалаврської роботи **Розробка системи керування трьохосьовим роботом маніпулятором**

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 68

5. З огляду на потребу в адаптації сучасного інженерного навчання до реалій ринку праці, виникає необхідність розробки доступних і функціональних лабораторних стендів, що моделюють роботу реальних роботизованих систем. Особливої уваги заслуговують трьохосьові маніпулятори, які забезпечують достатню ступінь свободи для виконання типових задач транспортування, сортування, укладання, а також дозволяють відпрацьовувати алгоритми траекторного керування й зворотної кінематики. У зв'язку з цим темою бакалаврської роботи обрано розробку системи керування трьохосьовим роботом-маніпулятором, що має на меті створення навчального програмно-апаратного комплексу, здатного виконувати базові маніпуляційні функції, забезпечуючи платформу для вивчення принципів робототехніки, сенсорики, приводів і програмування у реальному часі. Тому тема бакалаврської роботи є актуальною. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи. В другому розділі здійснено розробку електричної частини робота-маніпулятора. В третьому розділі виконано розробку системи керування трьохосьовим роботом маніпулятором.

Підпис студента _____

" 2 " 06 20 25 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 4 від " 28 " 06 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК 4,5 / B

Рекомендації ЕК

впровадити в навчальній
праці на у виробництві




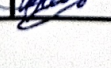
Особливі відмітки _____

Технічний секретар _____

" 28 " 06 20 25 р.

ЗМІСТ

	стор.
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	8
1.1 Загальні відомості про робототехніку	8
1.2 Загальні відомості про роботів	10
1.3 Загальні відомості про маніпулятори	15
1.4 Класифікація приводів роботів та маніпуляторів	17
1.5 Системи керування роботами та маніпуляторами та інформаційні системи	20
1.6 Приклади використання Arduino Uno в різних пристроях	22
1.7 Огляд мов програмування управління маніпулятором	26
1.8 Задачі, які необхідно вирішити в бакалаврській роботі	29
1.9 Висновки до першого розділу	31
2 Розробка електричної частини робота-маніпулятора	32
2.1 Опис конструкції робота маніпулятора	32
2.2 Вибір сервоприводів для електричної частини робота маніпулятора	34
2.3 Технічні характеристики робота маніпулятора	38
2.4 Висновки до другого розділу	40
3 Розробка системи керування трьохосьовим роботом маніпулятором	42
3.1 Розробка системи керування роботом маніпулятором на основі Arduino	42

БРМА25.00.00.000 ПЗ								
					Розробка системи керування трьохосьовим роботом маніпулятором	Літера	Арквш	Арквшів
Зм.	Арк.	Недокум.	Підпис	Дата		4	68	
Виконав	Хруш				ХНУ гр.РМ-21-1			
Перевір.	Скиба							
Н.контр.								
Затвер.	Неймак							

ВСТУП

Ідея створення автоматизованих машин, здатних виконувати завдання замість людини, виникла ще в глибоку давнину й поступово переросла з фантастичних уявлень у реальні інженерні рішення [1]. Сучасний рівень розвитку науки і техніки дозволив створити роботизовані системи, що здатні не лише замінювати людину в умовах важкої, монотонної або небезпечної праці, а й значно перевищувати її за точністю, швидкістю виконання операцій та надійністю.

Робототехніка стала однією з ключових складових Четвертої промислової революції (Industry 4.0), забезпечуючи автоматизацію виробництва, логістики, медицини, агропромисловості, обслуговування й наукових досліджень. Такі світові лідери, як ABB Robotics, KUKA, Yaskawa, Universal Robots, Tesla, Fanuc, Foxconn інвестують мільярди доларів у розробку й впровадження інтелектуальних роботизованих систем [2-8]. Наприклад, компанія Foxconn вже впровадила понад мільйон роботів на своїх виробничих лініях, автоматизуючи процес складання електроніки.

У розвинених країнах значна частка виробничих процесів повністю виконується за участі роботів. Трьохосьові та багатоосьові маніпулятори стали невід'ємними елементами сучасних гнучких виробничих систем (FMS), що забезпечують високий рівень повторюваності операцій і точне позиціонування у просторі. Вони активно використовуються в автомобілебудуванні, мікроелектроніці, лабораторній автоматизації та складальній техніці.

Водночас в Україні рівень застосування промислових роботів залишається низьким, але спостерігається позитивна динаміка розвитку робототехнічного напрямку в освітній сфері. Зокрема, університети, коледжі та профтехучилища впроваджують навчальні платформи на базі роботів DOBOT Magician, Niryu One, Festo Didactic, LEGO Education, що дають можливість студентам засвоїти принципи побудови мехатронних систем, методи програмного керування, основи кінематики та динаміки виконавчих механізмів [9-12].

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З огляду на потребу в адаптації сучасного інженерного навчання до реалій ринку праці, виникає необхідність розробки доступних і функціональних лабораторних стендів, що моделюють роботу реальних роботизованих систем. Особливої уваги заслуговують трьохосьові маніпулятори, які забезпечують достатню ступінь свободи для виконання типових задач транспортування, сортування, укладання, а також дозволяють відпрацьовувати алгоритми траєкторного керування й зворотної кінематики.

У зв'язку з цим темою бакалаврської роботи обрано розробку системи керування трьохосьовим роботом-маніпулятором, що має на меті створення навчального програмно-апаратного комплексу, здатного виконувати базові маніпуляційні функції, забезпечуючи платформу для вивчення принципів робототехніки, сенсорики, приводів і програмування у реальному часі.

Актуальність роботи зумовлена нагальною потребою в удосконаленні технічного навчання, адаптації освітніх програм до вимог промисловості 4.0, а також у розробці власних доступних роботизованих платформ, що можуть бути ефективно використані в освітньому процесі без залучення дорогого імпортного обладнання.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ БАКАЛАВРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1 Загальні відомості про робототехніку

Робототехніка - це міждисциплінарна прикладна галузь інженерії, яка охоплює розробку, виготовлення, програмування та експлуатацію автоматизованих технічних систем – роботів [13]. Термін «робототехніка» (англ. robotics) був уперше вжитий американським письменником Айзеком Азімовим у 1942 році, а слово «робот» з'явилося раніше - у 1920 році в п'єсі «R.U.R.» чеського драматурга Карела Чапека.

Сучасна робототехніка інтегрує знання з галузей:

механіки та кінематики;

електроніки, сенсорики та приводних систем;

теорії автоматичного керування;

обчислювальної техніки, штучного інтелекту та машинного навчання.

Залежно від функціонального призначення, розрізняють такі напрями робототехніки:

промислова — автоматизовані роботизовані лінії, зварювальні, пакувальні, монтажні маніпулятори;

сервісна — роботи для побутових, освітніх, медичних і соціальних застосувань;

мобільна — автономні платформи, дрони, наземні транспортні роботи;

екстремальна — системи для роботи в умовах підвищеної небезпеки: військові, підводні, космічні;

будівельна і аграрна — роботи для важких і циклічних зовнішніх процесів.

Стрімкий розвиток галузі обумовлений досягненнями в комп'ютерному зорі, сенсорних системах, інтегрованій електроніці та інтелектуальному програмному забезпеченні.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.1.1 Компоненти роботів

Типова робототехнічна система включає кілька основних підсистем: механічну конструкцію, приводи, сенсори, систему керування та програмне забезпечення [14]. Особливу роль у визначенні функціональності відіграють приводи, які забезпечують переміщення рухомих ланок.

Основні типи приводів:

- електродвигуни постійного струму (DC) — широко використовуються завдяки простоті керування, можливості реверсу й модуляції швидкості. Використовуються в мобільних роботах, сервомеханізмах та освітніх системах;

- крокові двигуни — забезпечують дискретне переміщення, що дозволяє точно позиціонувати об'єкт без зворотного зв'язку. Вони є популярними у 3D-друці, ЧПУ-обладнанні та компактних маніпуляторах;

- п'єзоелектричні двигуни — використовують високочастотні коливання для переміщення. Характеризуються високою точністю, безшумністю й малими розмірами. Застосовуються в мікророботах, оптичних і медичних приладах;

- пневматичні м'язи (типу McKibben) — імітують властивості біологічних м'язів. Завдяки гнучкості та легкості використовуються в біоінспірованих системах: екзоскелетах, реабілітаційних роботах, антропоморфних маніпуляторах;

- електроактивні полімери (EAP) — матеріали, які змінюють форму під дією електричного струму. Це перспективна технологія для м'якої робототехніки, хоча наразі обмежена через невисоку надійність;

- наноструктуровані м'язи на основі вуглецевих нанотрубок — знаходяться на стадії експериментів, демонструють потенціал до створення легких, надпотужних виконавчих елементів майбутніх поколінь роботів.

1.1.2 Системи керування роботами

Система керування — ключова складова роботизованого комплексу, що відповідає за прийняття рішень, обчислення траєкторій і генерацію керувальних

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сигналів для приводів [14]. За типом реалізації виділяють такі категорії систем керування:

1. Біотехнічні (з участю оператора).

- командні — окремі рухи задаються кнопками, тумблерами, важелями;
- копіюючі — рухи людини повторюються в реальному часі (у т.ч. екзоскелети);
- напівавтоматичні — оператор задає траєкторію або загальну дію, яку виконує система;

2. Автоматичні:

- програмні — працюють за жорстко заданими програмами, без урахування змін середовища;
- адаптивні — здатні реагувати на зміну умов роботи, мають елементи зворотного зв'язку;
- інтелектуальні — використовують алгоритми штучного інтелекту, експертні системи або нейронні мережі для прийняття рішень.

3. Інтерактивні:

- автоматизовані — можливість перемикання між ручним і автоматичним керуванням;
- супервізорні — людина виконує функцію постановки завдань, а всі дії реалізуються автоматикою;
- діалогові — реалізована взаємодія з оператором через мову, жести або інтерфейси віртуальної реальності, часто із залученням прогнозних моделей.

Розвиток систем керування тісно пов'язаний з досягненнями в технічній кібернетиці, теорії автоматичного регулювання, робототехнічному програмуванні та інтеграцією з IT-середовищами (ROS, LabVIEW, Python тощо).

1.2 Загальні відомості про роботів

Робот (від чеськ. *robota* — примусова праця) — це автоматичний пристрій, який частково або повністю замінює людину під час виконання завдань, особливо

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

в умовах, небезпечних для здоров'я або життя, або ж у важкодоступних середовищах [15]. Роботи можуть діяти автономно — за попередньо заданою програмою або алгоритмом штучного інтелекту, напівавтоматично — під контролем оператора, або в інтерактивному режимі — у співпраці з людиною. Їхнє застосування дозволяє знизити витрати, підвищити ефективність і безпеку в таких галузях як промисловість, логістика, медицина, будівництво, а також в обслуговуванні радіоактивних, токсичних і вибухонебезпечних середовищ.

Промисловий робот — це автоматизований пристрій, що зазвичай складається з маніпулятора (роботизованої "руки") та програмованої системи керування. Він виконує завдання з переміщення об'єктів, збирання, зварювання, фарбування тощо. Сучасні промислові роботи, як-от серії Yaskawa Motoman, ABB IRB, KUKA KR або FANUC LR Mate, є невід'ємною частиною гнучких виробничих систем (ГВС), забезпечуючи безперервну роботу 24/7, швидку зміну програм під інші продукти, інтеграцію зі смарт-сенсорами та візійними системами, а також синхронізацію з іншими автоматизованими машинами [2-6]. Такі системи сприяють зростанню продуктивності, точності та зниженню виробничих ризиків.

1.2.1 Побутові роботи

Побутові роботи — це автоматизовані пристрої, призначені для допомоги в повсякденному житті [14]. Найбільш поширеним прикладом є роботи-прибиральники, зокрема моделі iRobot Roomba, Roborock, Ecovacs Deebot, які здатні самостійно прибирати приміщення, будувати карти кімнат та повертатися на базу для підзарядки. Серед людиноподібних асистентів варто згадати Samsung Ballie — домашній робот-компаньйон, який може взаємодіяти з іншими пристроями розумного дому, охороняти житло, нагадувати про справи та навіть проєктувати відео на стіни. У галузі розпізнавання мовлення, міміки та поведінки активно розвиваються роботи-компаньйони, такі як LOVOT від Groove X (Японія) — для емоційної підтримки, або Amazon Astro — мобільний помічник із

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

голосовим керуванням і функціями моніторингу. Також популярним напрямом є освітні та розважальні роботи, наприклад LEGO Education SPIKE Prime або UBTECH Jimu Robot — програмовані набори для дітей. Велика спільнота ентузіастів і технічних гуртків займається робототехнічним моделізмом, створюючи як автономних, так і радіокерованих роботів для змагань з робо-сумо, робофутболу та роботів-спринтерів.

1.2.2 Промислові роботи

Промислові роботи — це автоматизовані системи, здатні виконувати різні завдання на виробництві: зварювання, фарбування, пакування, складання, контроль якості тощо [16]. Вони є ключовим елементом сучасних гнучких виробничих систем. Із початку 2000-х розвиток мікроелектроніки, сенсорики та штучного інтелекту дозволив значно розширити функціональні можливості роботів, зменшити їх вартість і зробити доступними для малого та середнього бізнесу. Виробники FANUC, ABB, Yaskawa, KUKA, Universal Robots та Doosan Robotics щороку випускають десятки тисяч промислових маніпуляторів. Особливої популярності набули кооперативні роботи (cobots), які безпечно працюють поруч із людьми, легко програмуються й не потребують огорожі. Прикладами є UR10e (Universal Robots), CRX Series (FANUC), LBR iiwa (KUKA). Сучасні роботи оснащуються високоточними енкодерами та датчиками зусилля, машинним зором, системами глибинного навчання для розпізнавання об'єктів, інтерфейсами віддаленого керування. Завдяки програмованим контролерам і адаптивним алгоритмам роботи здатні самостійно оптимізувати траєкторію руху, обирати режими обробки та реагувати на зміни в середовищі. Конструкційно вони складаються з механічної частини (маніпулятор, захоплювач, база), системи управління (ПЛК або мікропроцесора) і сенсорної частини (оптичні, температурні, силові датчики).

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2.3 Маніпулятори

Маніпулятор — це механічна система, що дозволяє точно позиціонувати інструмент або захоплювач у просторі [17]. Основу його будови становлять послідовно з'єднані ланки, які здійснюють поступальні або обертальні рухи. Від їх кількості та конфігурації залежить ступінь свободи та область дії пристрою. Сучасні маніпулятори можуть оснащуватись електроприводами, гідравлічними приводами для потужних операцій або пневматичними системами для швидких дій. Захватні пристрої поділяються на універсальні (механічні «руки»), вакуумні (для скла, плат) і спеціалізовані, створені індивідуально, зокрема за допомогою 3D-друку. Замість грипів маніпулятори можуть нести робочі інструменти: зварювальні головки, викрутки, фрези, фарбопульти або головки 3D-друку. До прикладів належать UR5e, KUKA LBR iiwa, ABB IRB 6700, Boston Dynamics Stretch — мобільний маніпулятор для складів, OnRobot RG2 і Schunk Co-act EGP-C — адаптивні грипері з датчиками сили.

1.2.4 Система пересування

Система пересування визначає спосіб руху робота у просторі [18]. У промислових умовах це можуть бути лінійні напрямні, монорельси або рельсові платформи для точного переміщення маніпуляторів. Колісні візки застосовуються у мобільних роботах, що обслуговують цехи та склади (наприклад, MiR100, OTTO Motors). Для складних умов використовуються гусеничні платформи (на будівельних або рятувальних роботах), крокуючі системи (пересування сходами, по нерівностях), роботи з вакуумними присосками (наприклад, ECOVACS Winbot). Сучасні платформи оснащуються лідаром, камерами, використовують SLAM-алгоритми та можуть ухилятися від перешкод у режимі реального часу.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1.2.5 Управління

Типи управління поділяються на програмне — найпростіше, без зворотного зв'язку, що реалізується в системах з ПЛК; адаптивне — з використанням сенсорів і алгоритмів у реальному часі; на основі штучного інтелекту — з елементами машинного навчання; дистанційне — з керуванням оператором [14]. Принципи побудови включають зворотний зв'язок (контроль параметрів стану), ієрархічність (розподіл за рівнями управління), підлеглі регулятори (позиція-швидкість-струм). Управління може бути інтегроване з MES та ERP-системами для синхронізації з виробничими процесами.

1.2.6 Дії промислового робота

До основних дій промислового робота належать переміщення деталей і заготовок, зварювання (точкове, шовне), фарбування, високоточне різання, складання, монтаж, контроль якості [14]. Перевагами є швидка окупність, виключення людських помилок, підвищення точності, безперервна робота 24/7, оптимізація площ та ресурсів, підвищення безпеки праці.

1.2.7 Робот CONCERT

CONCERT — це модульний колаборативний робот, створений для виконання завдань на будівельних майданчиках [19]. Його конструкція передбачає можливість швидкої перебудови за рахунок активних і пасивних модулів, що дозволяє адаптуватися до буріння, нанесення ізоляції, шліфування, транспортування. Він оснащений потужними моторами, системою автоматичного оновлення параметрів, лазерними сканерами, 3D-камерами, ультразвуковими сенсорами. При розмірах 1×0,7 м і масі 150 кг, робот здатний переносити понад 200 кг і виконувати роботи на висоті до 3,5 м. CONCERT може взаємодіяти з людьми за допомогою голосових команд, самостійно адаптуватися до середовища

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

й значно підвищувати ефективність будівельних процесів. Його застосування дозволяє автоматизувати рутинні й небезпечні операції, знижуючи ризики для персоналу, зменшуючи витрати та пришвидшуючи загальний цикл виконання будівельних робіт. Наразі робот перебуває на етапі доопрацювання, а в перспективі планується його комерціалізація та інтеграція з технологіями ВІМ і розширення функціональності за рахунок додаткових модулів.

1.3 Загальні відомості про маніпулятори

Маніпулятор — це механізм, що складається з просторової важільної конструкції та системи приводів, який під керуванням програмованого автоматичного пристрою або оператора виконує дії (маніпуляції), подібні до рухів руки людини [17]. Завдяки точності позиціонування, гнучкості та можливості адаптації до різних умов роботи, маніпулятори широко застосовуються в промисловості, медицині, сервісній робототехніці для переміщення, захоплення, утримання або обробки об'єктів у тривимірному просторі.

1.3.1 Основні поняття і визначення. Структура маніпуляторів

Формула будови маніпулятора — це математичне подання його структурної схеми, яка відображає кількість ступенів свободи, типи кінематичних пар і їх орієнтацію відносно базової системи координат, прив'язаної до нерухомої ланки [17]. Рухи маніпулятора поділяються на глобальні (для роботів із мобільною основою), регіональні (транспортні, що виконуються «рукою») та локальні (орієнтувальні, що здійснюються «кистою» маніпулятора). Кінематичний ланцюг умовно поділяється на дві частини: рука відповідає за переміщення точки захвату (центру захоплення), а кисть — за орієнтацію захватного пристрою у просторі. Робочим простором маніпулятора називають об'єм, обмежений поверхнями, що описують множину всіх можливих положень його ланок. Зона обслуговування визначається множиною допустимих положень центра захвату і залежить від

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

структури пристрою, конфігурації його кінематичних пар і конструктивних обмежень.

До основних завдань механіки маніпуляторів належать синтез і аналіз виконавчих механізмів, програмування рухів, розрахунків керуючих зусиль і реакцій у кінематичних парах, а також урівноваження конструкцій. Ці задачі розв'язуються методами дослідження структури, геометрії, кінематики та динаміки просторових багатоступеневих механізмів. Виділяють прямі задачі (аналізу), які передбачають визначення положення кінцевої ланки за відомими координатами приводів, та зворотні задачі (синтезу), які полягають у знаходженні необхідних координат приводів за заданою траєкторією руху захвату. Зворотні задачі можуть мати кілька допустимих рішень, серед яких слід обирати оптимальне. У кінематиці також розв'язуються задачі визначення швидкостей і прискорень кінцевої ланки, а в динаміці — задачі визначення сил і моментів у приводах, які забезпечують реалізацію заданого закону руху.

1.3.2 Класифікація маніпуляторів

Маніпулятори класифікують за кількома ознаками. За характером виконуваних робіт розрізняють універсальні маніпулятори, що застосовуються для підйомно-транспортних задач у машинобудуванні, а також для механізації обслуговування технологічного обладнання — наприклад, при завантаженні/розвантаженні деталей, виконанні зварювальних або свердлильних операцій [17]. Спеціальні маніпулятори призначені для вузьких технологічних процесів, зокрема в ливарному виробництві або ковальсько-пресових цехах. За способом керування виокремлюють ручні (копіювальні) маніпулятори, якими безпосередньо керує оператор, зазвичай шляхом відтворення заданої траєкторії, а також автоматичні маніпулятори, що працюють відповідно до наперед заданої програми, реалізованої через комп'ютерні системи або мікроконтролери.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

1.3.3 Автооператори

Автооператор (АО) — це різновид маніпулятора, що функціонує в складі автоматичних машин, виконуючи повторювані дії у межах жорстко запрограмованого технологічного циклу [17]. Його робота здійснюється з використанням механічних або електронних програмоносіїв, серед яких найчастіше використовуються кулачкові механізми, перфострічки, магнітні стрічки. Автооператори знаходять широке застосування у сфері лиття під тиском (для заливки або змащення прес-форм), при обслуговуванні листоштамповочних пресів, а також у металообробці — для установки та зняття деталей на верстатах з числовим програмним керуванням. Їх перевагою є висока повторюваність дій, швидкість і точність, що дозволяє значно скоротити час циклу і зменшити вплив людського чинника на якість продукції.

1.4 Класифікація приводів роботів та маніпуляторів

Приводи, які використовуються у конструкціях роботів і маніпуляторів, класифікуються за кількома ключовими ознаками [20]. За видом енергії, що використовується для приводу виконавчих органів, виділяють пневматичні — на основі стисненого повітря, гідравлічні — що працюють за рахунок рідинного тиску, електромеханічні — з використанням електродвигунів, а також комбіновані, які поєднують переваги різних типів (наприклад, електрогідравлічні). Щодо способу відліку координат приводи поділяються на системи з відносним відліком — де позиція визначається зміщенням від початкової точки (зокрема, крокові двигуни), та системи з абсолютним відліком координат — де положення визначається за допомогою зворотного зв'язку (енкодерів, резольверів та ін.).

До складу приводу зазвичай входять підсилювачі потужності, електродвигуни, передаточні механізми та датчики зворотного зв'язку. Залежно від призначення, застосовуються двигуни загального призначення — асинхронні

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

або постійного струму, а також спеціалізовані — крокові (лінійні або поворотні). Додатково електроприводи класифікують за типом передаточного механізму на редукторні і безредукторні; за ступенем керованості — на регулюючі, програмно-керовані, слідкуючі й адаптивні; за рівнем автоматизації — на автоматизовані (з участю оператора) та автоматичні (з повною автономією).

1.4.1 Гідропривід [21, 22]

Гідравлічні приводи є одним із найбільш ефективних засобів забезпечення потужного і точного керування в робототехнічних системах. Вони характеризуються високою швидкістю, здатністю до безступінчастого регулювання швидкості, великим коефіцієнтом підсилення потужності, а також відносною простотою конструкції та високою надійністю. Такі переваги дозволяють ефективно застосовувати гідроприводи у важких промислових умовах, зокрема в роботах великої вантажопідйомності. Разом з тим до їхніх недоліків належать можливість витоків робочої рідини через ущільнення, потреба у регулярному технічному обслуговуванні та необхідність контролю температурного режиму через системи охолодження або підігріву.

У конструкціях гідроприводів застосовуються два основні типи гідродвигунів: лінійні гідроциліндри — для реалізації поступального руху виконавчих органів, та поворотні гідродвигуни (гідромотори) — для здійснення обертальних рухів.

1.4.2 Пневмопривід [21, 22]

Пневматичні приводи поширені в промисловій робототехніці, особливо для систем із вантажопідйомністю до 20 кг. Їх переваги полягають у простоті конструкції, надійності, високій швидкості реакції на команди, можливості використання стисненого повітря з загальнозаводської пневмосистеми, а також у безпечному функціонуванні в агресивних і вибухонебезпечних середовищах.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Завдяки високому коефіцієнту корисної дії і низькій вартості експлуатації пневмоприводи є економічно вигідними рішеннями для багатьох автоматизованих систем.

До основних недоліків пневмоприводів відносять потребу у спеціальних пристроях позиціювання для досягнення точності керування, відносно низьку питому потужність через стисливість повітря, а також високий рівень шуму під час роботи. Основними елементами пневмоприводних систем є пневматичні циліндри типу ЦРГП, поворотні пневмодвигуни типу ПДП, цифрові багатопозиційні лінійні та ротаційні пневмоприводи.

1.4.3 Комбіновані приводи [21, 22]

Комбіновані приводи об'єднують характеристики декількох типів приводів для досягнення оптимального балансу між потужністю, точністю та гнучкістю управління. Зокрема, електрогідравлічний привід поєднує високу точність електричного керування з великою силою гідравлічного виконавчого елемента, що є ефективним у важких умовах, зокрема при переміщенні значних мас або в умовах, де вимагається високий ступінь позиціювання. Приводи позиційного типу забезпечують точне управління положенням робочого органа шляхом використання систем зворотного зв'язку — датчиків положення, і можуть бути реалізовані як на електричній, так і на гідравлічній базі.

Окремий тип комбінованого приводу становить кроковий (імпульсний) привод, що працює за принципом дискретного переміщення із заданим кроком. Такий привод забезпечує високу точність позиціювання без використання зворотного зв'язку, що спрощує конструкцію і дозволяє реалізувати компактні та енергоефективні системи керування в освітніх, сервісних або легких промислових маніпуляторах.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

1.5 Системи керування роботами та маніпуляторами та інформаційні системи

1.5.1 Класифікація систем керування роботами та маніпуляторами

Системи керування маніпуляторами та роботами класифікують за низкою технічних ознак [23]. За способом позиціювання виділяють позиційні системи (малоточкові — до 10 точок і багатоточкові — до 100 точок позиціювання), контурні системи, що забезпечують плавний рух за заданою траєкторією, та комбіновані, які поєднують переваги обох типів. За видом енергоносія системи поділяються на механічні, гідропневматичні та електричні. Залежно від способу представлення інформації, керування може бути електромеханічним, числовим (цифровим), гібридним (поєднання цифрових і аналогових методів), цикловим або аналоговим. За типом програмоносія виділяють системи з перфострічкою, магнітним барабаном, оптичним диском, магнітною стрічкою або магнітним диском, наприклад дискетою. За обсягом інформації в програмі керування системи поділяються на жорстко програмні, що працюють із фіксованими алгоритмами, та адаптивні, здатні підлаштовуватися до змін зовнішніх умов. За способом програмування виділяють метод розрахунку (створення програми вручну чи автоматично), метод навчання (повторення дій оператора) та самонавчальні системи, що базуються на алгоритмах штучного інтелекту.

1.5.2 Види систем керування [16-18]

Системи керування промисловими роботами та маніпуляторами поділяються на автономні, комплексні та багаторівневі. Автономні системи є найпоширенішими у вузькоспеціалізованих роботизованих установках і зазвичай мають модульну конструкцію, що дозволяє легко адаптувати їх до різних задач. До типових представників відносять уніфіковану циклову модульну систему (УЦМ), уніфіковану позиційну модульну систему (УПМ) та уніфіковану контурну

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

модульну систему (УКМ). Комплексні системи застосовуються для керування цілим виробничим комплексом, наприклад, взаємодії роботів із ЧПУ-обладнанням. Багаторівневі системи використовуються для організації керування роботами в межах автоматизованих виробничих ділянок, де існує декілька рівнів ієрархії. Вони характеризуються високими функціональними можливостями, однак є дорогими і складними в реалізації.

Основними прикладами автономних систем є малоточкові циклові системи позиційного керування (УЦМ), які використовуються в технологічних процесах із невеликою кількістю позицій. Вони ефективно працюють у ковальсько-пресовому та ливарному виробництві, на гальванічних лініях та у великосерійному металообробному виробництві (рис.1.1).

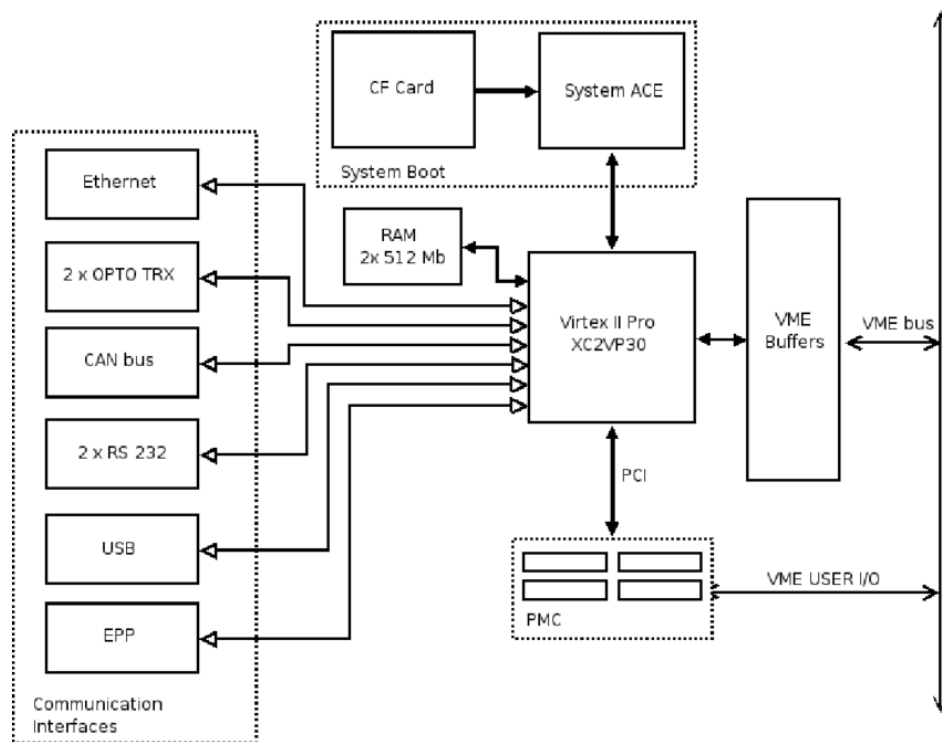


Рисунок 1.1 — структурна схема УЦМ

Системи УПМ (числові системи позиційного керування) розраховані на більшу кількість позицій і застосовуються для підйомно-транспортних задач, нескладних монтажних операцій або контактного точкового зварювання (рис.1.2).

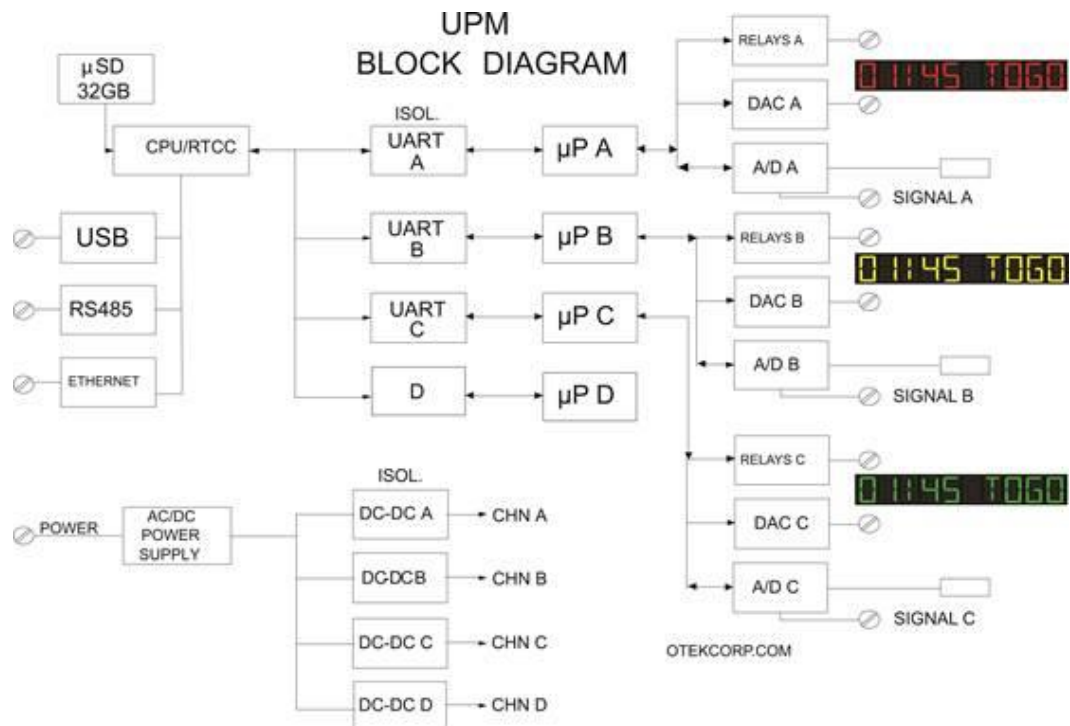


Рисунок 1.2 — Структурна схема УПМ)

Системи контурного керування (УКМ) реалізують складний просторовий рух робочого органа, необхідний, зокрема, під час дугового зварювання або високоточних монтажних дій.

1.6 Приклади використання Arduino Uno в різних пристроях

1.6.1 Сонячний трекер [24]

Сонячний трекер — це система, що автоматично відслідковує положення сонця на небосхилі, забезпечуючи оптимальну орієнтацію сонячної панелі для максимального поглинання сонячної енергії. Основою є контролер Arduino Uno, який обробляє сигнали з двох фоторезисторів, встановлених під кутом 90° один до одного. При виявленні різниці освітленості, контролер керує сервоприводом, змінюючи положення панелі до досягнення балансу інтенсивності світла на обох датчиках. Для покращення точності на фоторезистори надягають затемнюючі

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

1.6.2 Тепловізор [25]

Тепловізор — це електронний пристрій для безконтактного вимірювання температури поверхонь у режимі реального часу, що формує теплову карту об'єкта. У недорогих конструкціях використовуються інфрачервоні сенсори типу MLX90640 або MLX90614, які здатні вимірювати температуру у форматі масиву пікселів. Пристрій може доповнюватися поворотним механізмом із сервоприводами для двовісного сканування і лазерним вказівником. Контролер — Arduino або ESP32 — зчитує дані сенсора і генерує відповідну теплову мапу, яка виводиться на екран або передається на комп'ютер. Завдяки компактності, така система може бути змонтована в поворотному корпусі й використана в дослідницьких цілях. На рис. 1.5 представлено приклад теплової карти монітора.

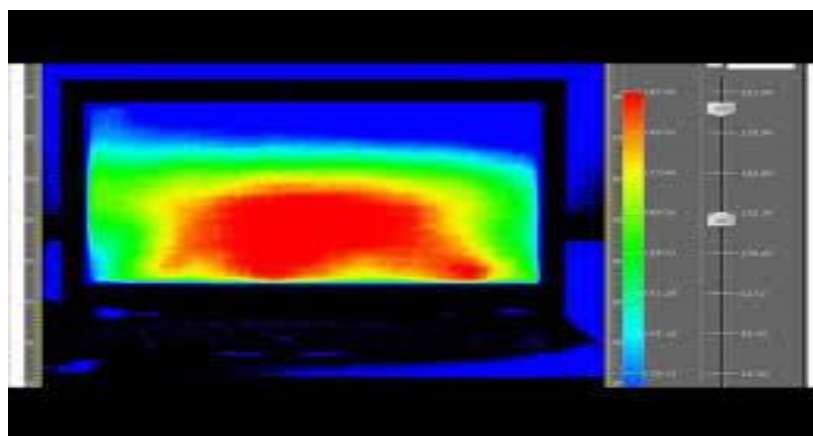


Рисунок 1.5 — Теплова карта поверхні комп'ютерного монітора

На рис. 1.6 — карта температури двигуна автомобіля.

1.6.3 Система розпізнавання облич та стеження (рис. 1.7) [26]

Система розпізнавання облич із функцією стеження є прикладом поєднання комп'ютерного зору з механікою. Вона складається з вебкамери, закріпленої на платформі з двома сервомоторами (по осях X і Y), та комп'ютера або мікроконтролера, що виконує обчислення.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

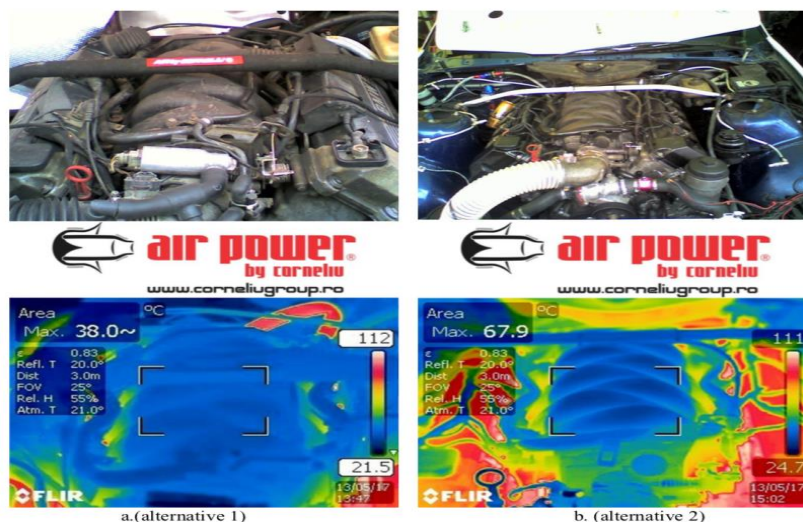


Рисунок 1.6 — Теплова карта двигуна автомобіля

Для аналізу відеопотоку використовується OpenCV, MediaPipe або нейромережеві моделі типу YOLOv8. Система визначає координати центру обличчя в кадрі та обчислює необхідний поворот камери для фокусування на ньому. Управління сервомоторами реалізується через Arduino, ESP32 або безпосередньо через GPIO мікрокомп'ютера. Це дозволяє створити інтелектуальну систему відеоспостереження, здатну динамічно супроводжувати об'єкти у полі зору. Сфери застосування — системи безпеки, контроль доступу, інтерактивні освітні або рекламні пристрої (рис.1.7).



Рисунок 1.7 — Модель системи розпізнавання облич та стеження

Існують інші приклади використання Arduino Uno в різних пристроях, що наведені на аркуші [БРМА25.00.00.000ДО].

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

1.7 Огляд мов програмування управління маніпулятором

1.7.1 Мова програмування C++ [27]

1.7.1.1 Виникнення і еволюція мови C++

Мову C++ розробив Б'ярн Страуструп — співробітник науково-дослідного центру AT&T Bell Laboratories у США. Він має ступені магістра і доктора в галузі обчислювальної техніки та спеціалізується на розподілених і операційних системах, а також мовах програмування. Мова C++ виникла як розширення мови C, зберігаючи її низькорівневі можливості, що особливо важливо для системного програмування. На її формування вплинули попередні мови: BCPL — з якої C успадкувала синтаксис і концепцію коментарів; SIMULA-67 — джерело об'єктно-орієнтованих елементів, таких як класи, спадкування і віртуальні функції; ALGOL-68 — що вплинув на свободу структурування коду та перевантаження операторів.

Перші версії нової мови мали назву «C з класами» і застосовувались ще з початку 1980-х років, однак на той час їм бракувало ключових можливостей, як-от перевантаження операцій, посилання чи віртуальні методи. Назву C++ запропонував Рік Маскітті у 1983 році, використавши інкрементний оператор «++» як символ еволюції від C. Уже у 1985 році з'явилася перша офіційна публікація мови, після чого вона активно розвивалася. Вдосконалення між 1985 і 1991 роками включали множинне спадкування, шаблони (templates), константні функції-члени, чисті віртуальні методи та інші елементи об'єктно-орієнтованого програмування. Починаючи з 1987 року, почалась стандартизація C++, а у 1989 ANSI створив комітет X3J16, який пізніше координував міжнародний стандарт ISO.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

1.7.1.2 Зауваження щодо проекту мови C++ [27]

Однією з базових засад при створенні C++ була простота використання та орієнтація на сумісність із мовою C. Якщо стояв вибір між спрощенням транслятора або документації, перевагу надавали саме зрозумілості документації. C++ не містить вбудованих високорівневих структур типу «рядок» чи «матриця» — їх повинен визначати програміст, використовуючи механізми мови. Це дозволяє створювати типи даних, які за використанням не поступаються вбудованим. У мову навмисно не включались функції, які могли б створити накладні витрати, навіть якщо вони не використовуються. Наприклад, кожен об'єкт не містить службової інформації за замовчуванням.

Мова розроблялася для використання в системах UNIX із компіляторами на базі мови C, однак її функціональні можливості дозволяють ефективно працювати і в сучасних середовищах із підтримкою динамічного завантаження, баз даних, складних систем трансляції тощо. Типова політика C++ полягає в орієнтації на виявлення помилок на етапі трансляції, що значно покращує надійність без створення накладних витрат під час виконання програм.

1.7.1.3 Порівняння мов C++ і C [27]

Вибір C як бази для створення C++ був обґрунтований її універсальністю, стислістю, низьким рівнем абстракції, широкою підтримкою платформ і відповідністю системному програмуванню. Перенесення існуючих програм, написаних на C, в нову парадигму стало можливим без необхідності повного переписування. Бібліотеки C можна використовувати в C++, що знижує бар'єр входу для програмістів і зберігає сумісність на рівні компіляції та компонування.

Разом із розвитком C++, її стандарт частково вплинув і на мову C: стандарт ANSI C прийняв деякі синтаксичні особливості, зокрема формат опису функцій і тип void*. Попри це, повна сумісність із C не була можливою через посилене впровадження типобезпечності й концепції користувацьких типів у C++. Для

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективного засвоєння C++ знання C не є обов'язковим, але може бути корисним. Водночас, програмісту необхідно переорієнтуватися на об'єктно-орієнтоване мислення, що передбачає структурування програми навколо класів, об'єктів та інтерфейсів, а не лише функцій.

1.7.1.4 Ефективність та структура [27]

C++ зберігає ефективність C, дозволяючи керувати апаратними ресурсами без додаткових накладних витрат. Конструкції `new`, `delete` і механізм винятків (`throw`) є винятками, що вимагають підтримки під час виконання. Усі інші інструкції транслюються в ефективний машинний код. C++ зберігає строгість типів, що дає змогу компілятору проводити глибокий аналіз і оптимізацію ще на етапі компіляції. Завдяки цьому зменшується кількість помилок і підвищується швидкість виконання.

Особливу увагу в C++ приділено структурі програм. Великий проєкт із десятків тисяч рядків коду може бути ефективно реалізований лише за умови правильної модульності та організації. Мова дозволяє ізолювати складні апаратно-залежні фрагменти, описавши їх через чіткі інтерфейси. Це сприяє розробці масштабованих систем у командному середовищі. Незважаючи на насиченість системою типів, C++ дозволяє створювати компактніші й зручніші програми порівняно з аналогічними на C, особливо при використанні бібліотек STL і шаблонів.

1.7.2 Мова Асемблер [28]

Асемблер (`assembler`) — це мова програмування низького рівня, яка дозволяє створювати програми, максимально наближені до машинного коду. Він транслює інструкції, написані в символічній формі, безпосередньо у виконувані машинні команди процесора. Трансляція здійснюється у два проходи: на першому формуються адреси символічних імен, на другому — відбувається генерація

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

машинного коду [28].

Асемблер забезпечує абсолютний контроль над ресурсами системи і розташуванням команд у пам'яті, що є необхідним у задачах реального часу, драйверах пристроїв або мікроконтролерах. Він підтримує директиви, що не створюють машинного коду, але задають правила компонування, резервування пам'яті, зв'язків між модулями тощо. Крім того, макрокоманди дозволяють створювати шаблонні фрагменти коду, які автоматично розгортаються під час трансляції.

Хоча програмування на асемблері вимагає значно більше зусиль і обмежує переносимість коду, воно залишається незамінним для критично важливих систем, де потрібні швидкодія, мінімальні затримки та пряме керування апаратним забезпеченням. Із розвитком мікроконтролерів, систем-на-чипі (SoC) та вбудованих систем, роль асемблера зберігається, особливо в задачах ініціалізації систем, точного таймінгу або оптимізації.

1.8 Задачі, які необхідно вирішити в бакалаврській роботі

У процесі виконання бакалаврської роботи передбачається поетапне вирішення комплексу задач, спрямованих на проєктування, розробку, моделювання та тестування системи керування трьохосьовим роботом-маніпулятором для навчально-демонстраційного або лабораторного застосування. З урахуванням обраної тематики та актуальності досліджень визначено такі основні задачі:

1. Провести огляд існуючих технологічних та технічних рішень з автоматизації керування роботами-маніпуляторами. Здійснити аналіз сучасних систем керування, типів маніпуляторів, архітектур побудови, варіантів привідних систем і засобів реалізації зворотного зв'язку. Також проаналізувати приклади реалізації подібних систем у навчальній, сервісній та промисловій сферах.

2. Вибрати тип і модель маніпулятора для розробки системи управління. На основі аналізу технічних характеристик, функціонального призначення та умов

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експлуатації здійснити обґрунтований вибір конструкції маніпулятора з трьома ступенями свободи. Розглянути конфігурацію кінематичної схеми, типи приводів, особливості монтажу та можливості подальшої інтеграції з електронними та програмними компонентами системи керування.

3. Розробити апаратну частину системи управління. Передбачити вибір відповідного мікроконтролера (наприклад, Arduino або STM32), модулів живлення, драйверів двигунів, сенсорних елементів і виконавчих пристроїв. Розробити схему з'єднань, блок-схему або структурну схему системи та забезпечити її відповідність вимогам точності, надійності та масштабованості.

4. Розробити програмне забезпечення для системи керування. Написати програму керування рухом маніпулятора з використанням мови програмування (наприклад, C++), реалізувавши алгоритми позиціювання, обробки даних сенсорів, формування ШІМ-сигналів, реалізації циклів керування та зворотного зв'язку. Забезпечити можливість керування з ПК або через інтерфейс користувача.

5. Реалізувати функціональну модель або макет системи керування. Зібрати фізичний прототип або модель установки, змонтувати всі необхідні елементи, протестувати працездатність і точність виконання рухів. За потреби виконати налагодження, оптимізацію параметрів системи та усунення помилок.

6. Сформувані технічну документацію на розроблену систему. Оформити структурні, електричні та монтажні схеми, перелік елементів, інструкцію з експлуатації, вихідний код програми та інші необхідні документи, що забезпечують можливість відтворення та подальшого використання системи у навчальному процесі або в дослідницькій діяльності.

Таким чином, у результаті реалізації зазначених задач має бути створена повноцінна мікропроцесорна система керування тривісним роботом-маніпулятором із чітко визначеними функціями, структурою, принципом дії та програмним забезпеченням.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

1.9 Висновки до першого розділу

У першому розділі проведено системний огляд сучасного стану робототехніки, її класифікації, принципів побудови та інженерних підходів до створення роботизованих маніпуляторів. У результаті аналізу встановлено, що інтенсивний розвиток промислових, сервісних та освітніх роботів, зокрема тривісних маніпуляторів, визначається зростаючими вимогами до автоматизації, точності, гнучкості та надійності технічних систем.

Уточнено структуру робототехнічних систем, яка включає підсистеми сприйняття, керування, приводу та виконавчих механізмів. Розглянуто типи роботів за функціональним призначенням, серед яких маніпулятори займають ключове місце як універсальні елементи взаємодії з об'єктами довкілля. Виділено основні архітектури побудови маніпуляторів, системи керування (дискретні, контурні, адаптивні), типи приводів (електричні, пневматичні, гідравлічні та комбіновані), а також способи їх класифікації.

Особливу увагу приділено огляду мов програмування, що застосовуються для розробки систем керування маніпуляторами. Зокрема, мова C++ визначена як одна з найбільш ефективних завдяки своїй об'єктно-орієнтованій природі, низькорівневому контролю і високій ефективності, а асемблер — як важливий інструмент для написання критично важливих фрагментів коду з мінімальними витратами ресурсів.

Загалом, виконаний огляд підтверджує доцільність розробки системи керування трьохосьовим лабораторним маніпулятором як сучасним засобом для навчання, експериментів та дослідження мехатронних систем. Він дозволяє реалізувати міждисциплінарний підхід до навчання та розв'язувати практичні інженерні задачі в галузі автоматизації та робототехніки.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЧАСТИНИ РОБОТА МАНІПУЛЯТОРА

2.1 Опис конструкції робота маніпулятора

На рис. 2.1 (аркуш [БРМА25.00.00.000ДІ1]) представлено просторову 3D-модель механічної частини трьохосьового робота-маніпулятора, для якого проектується система керування. Конструкція маніпулятора реалізована за принципом послідовно з'єднаних жорстких ланок, з'єднаних поворотними кінематичними парами, що забезпечують необхідну кількість ступенів свободи для виконання базових маніпуляцій у просторі.

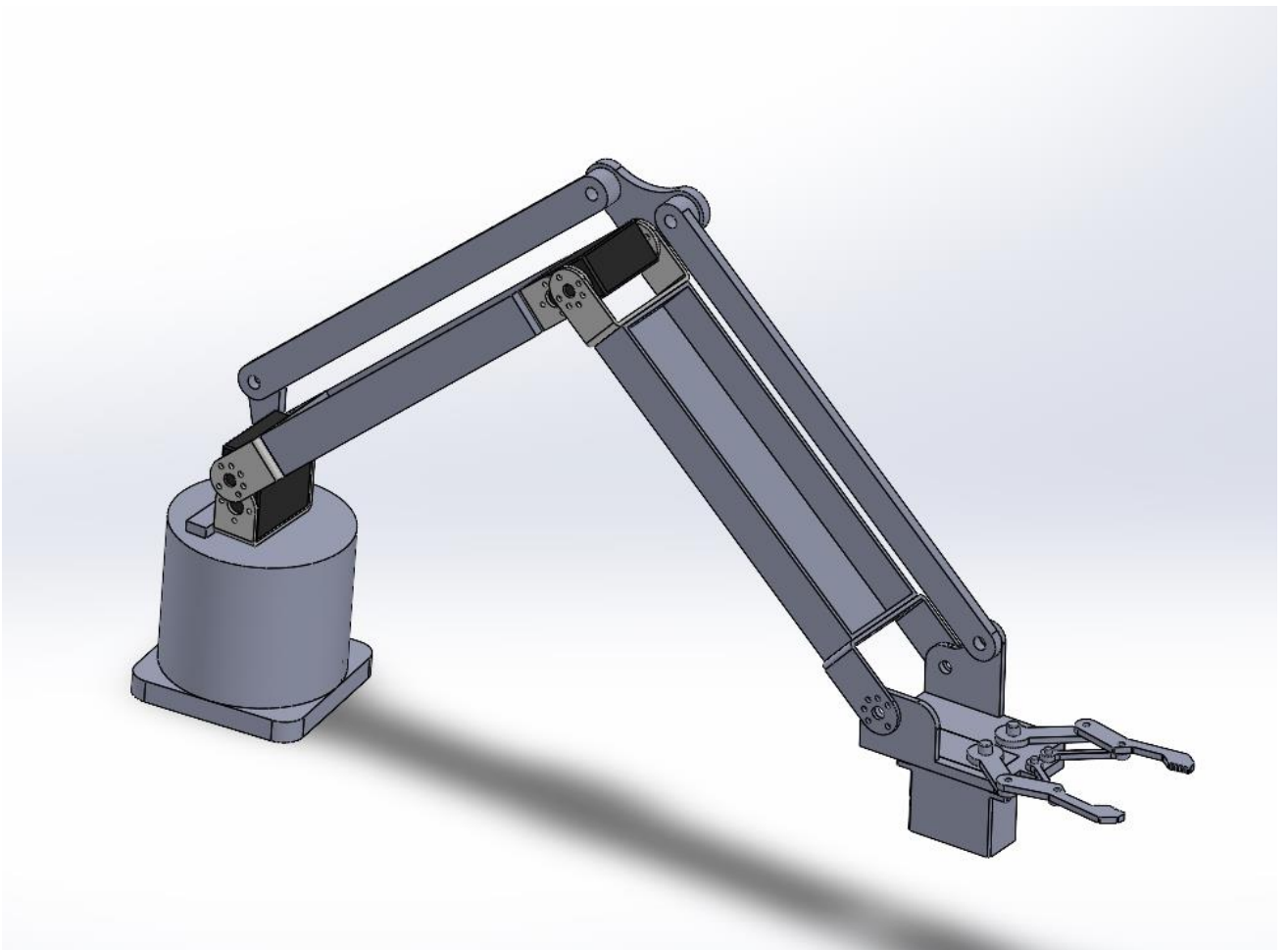


Рисунок 2.1 – Модель механічної частини маніпулятора

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Механічна структура робота включає такі основні компоненти:

1. Основа – це стаціонарна платформа циліндричної форми, яка слугує точкою кріплення та нульовим рівнем системи координат. Вона забезпечує горизонтальне обертання всієї конструкції за рахунок встановленого на ній приводу першої осі. Механізм обертання, ймовірно, реалізований через серводвигун або редуктор із високим передавальним числом для точного позиціонування.

2. Перша ланка (плече) – з'єднана з основою через вертикальний поворотний шарнір. Вона виконує підйом/опускання всієї робочої частини маніпулятора. У межах першого ступеня свободи реалізується вертикальне переміщення кінцевого виконавчого органа у відповідному секторі.

3. Друга ланка (передпліччя) – з'єднується шарніром з плечем і забезпечує зміну просторового положення схвата у вертикальній площині. Цей елемент відіграє ключову роль у формуванні робочої зони маніпулятора і виконує регіональні рухи (розгортання в радіусі досяжності).

Система тяги або паралелограмна конструкція – присутня у вигляді додаткових важелів, з'єднаних із основними ланками. Вона забезпечує збереження орієнтації інструменту або підтримання синхронного руху частин маніпулятора, що є ознакою кінематично збалансованої структури. Таке рішення підвищує точність позиціонування схвата без необхідності складного керування.

Схват (кінцевий виконавчий орган) – двопальцевий захоплювач, що може відкриватись і закриватись для захоплення об'єктів різної форми і розміру. Привід схвата зазвичай реалізується через сервомеханізм або малогабаритний актуатор, що дозволяє точно контролювати силу захоплення.

Загалом, конструкція маніпулятора передбачає три ступені свободи:

- обертання навколо вертикальної осі (база);
- поворот першої ланки (підйом/опускання);
- поворот другої ланки (розгинання/згинання).

Конструктивна схема є оптимальною для базових навчальних і демонстраційних задач з робототехніки, зокрема для розробки систем

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

координованого позиціювання у 2D/3D-просторі, навігації до заданої точки, керування схватом та обробки траєкторних задач. Механічна модель є достатньо простою для реалізації в умовах лабораторного середовища, при цьому вона забезпечує повну функціональність для базових досліджень систем керування та алгоритмів обертання, позиціювання і захоплення об'єктів.

2.2 Вибір сервоприводів для електричної частини робота-маніпулятора

Рухи ланок маніпулятора, а також стискання та розтискання захватного пристрою здійснюються за допомогою цифрових сервоприводів. На основі представленої конструкції (рис. 2.1, (аркуш [БРМА25.00.00.000PP1])), в якій довжина кожної з двох основних ланок становить приблизно по 200 мм, а загальна довжина маніпулятора разом із захватом - близько 570 мм, було виконано орієнтовний розрахунок навантаження, що впливає на приводи.

З урахуванням ваги сервоприводів (у середньому 60 г кожен) і передбачуваного матеріалу виготовлення ланок (пластик і легкий метал), повна вага конструкції без основи оцінюється на рівні близько 500 г. Із них 180 г припадає на три сервоприводи, що встановлені у структурі, а решта маси розподілена на елементи ланок і захват. Припускаючи рівномірний розподіл маси вздовж довжини маніпулятора, ефективна маса, що прикладена в точці дії захвата, становить близько 250 г, тобто 0,25 кг.

Для випадку, коли всі ланки маніпулятора орієнтовані горизонтально (перпендикулярно до сили тяжіння), згідно з основною формулою розрахунку моменту:

$$M = F \times L, \quad (2.1)$$

де F - сила тяжіння ($0,25 \text{ кг} \times 9,81 \approx 2,45 \text{ Н}$);

$L = 0,57 \text{ м}$.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підставивши значення у формулу (2.1) отримуємо максимальний момент на валу першого сервоприводу (рис.2.2):

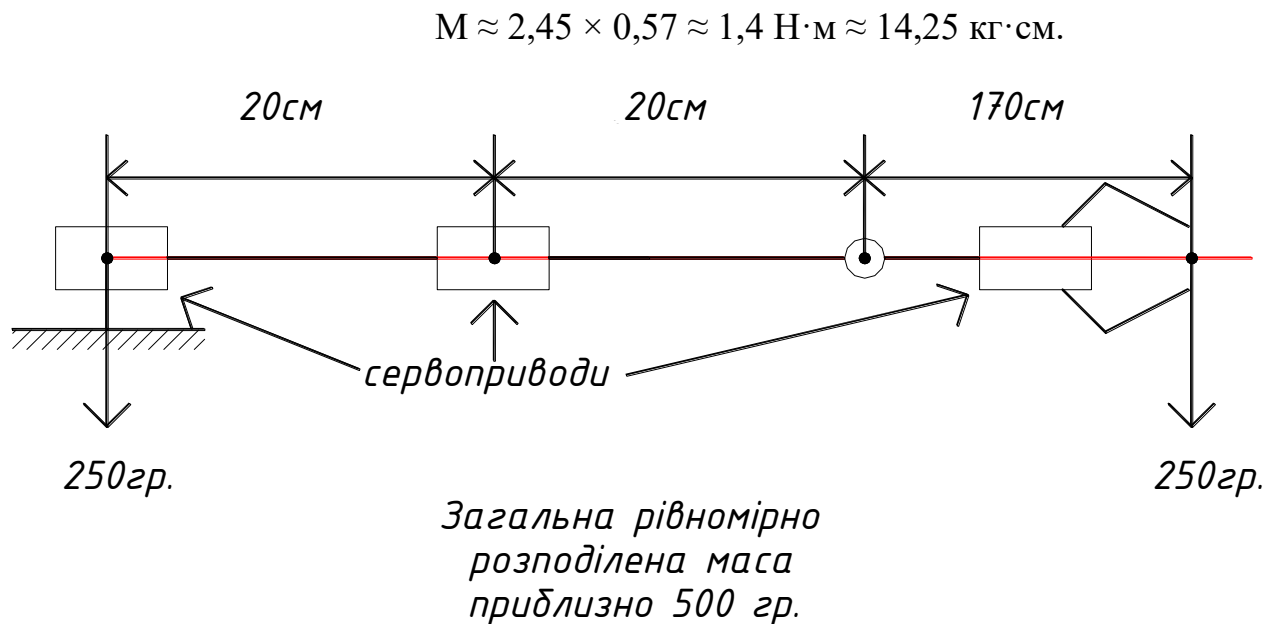


Рисунок 2.2 – Орієнтовна оцінка маси маніпулятора

Таким чином, для приводу першої та другої ланки необхідно використовувати сервоприводи, здатні розвивати момент щонайменше 15 кг·см. З огляду на доступність і технічні характеристики, для реалізації обертання основних ланок були обрані два потужні цифрові сервоприводи: DF15RMG (рис. 2.3) і RDS3115 (рис. 2.4) [29,30]. Обидва мають схожі габарити, металеві шестерні та адекватні значення моменту, необхідні для стабільної роботи конструкції.

Технічні характеристики сервопривода DF15RMG:

- кут повороту: 170°;
- швидкість: 60° / 0,16 с;
- максимальний момент: 19,3 кг·см при 7,4 В;
- металеві шестерні;
- габарити: 40 × 40 × 20 мм;
- вага: 65 г;

- робоча напруга: 5 – 7,4 В;
- максимальний струм: 3 А при 8,5 В;
- РРМ-вхід: 3 – 5 В;
- роздільна здатність: 2 мкс;
- частота керування: до 4 кГц [17].

Технічні характеристики сервопривода RDS3115:

- кут повороту: 180°;
- швидкість: 60° / 0,16 с;
- максимальний момент: 17 кг·см при 7,2 В;
- металеві шестерні;
- габарити: 40 × 40 × 20 мм;
- вага: 60 г;
- робоча напруга: 4,8 – 8,4 В [31].



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд сервоприводу DF15RMG з додатковими кронштейнами

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

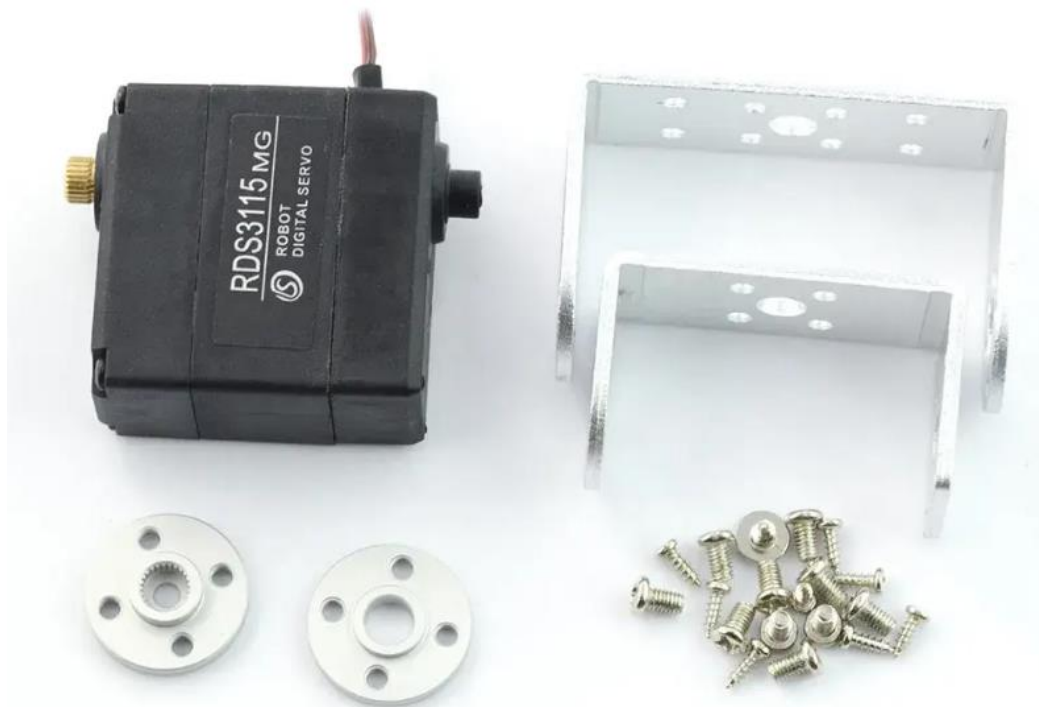


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд сервоприводу RDS3115 з додатковими кронштейнами

Для менш навантажених осей, а саме обертання основи та керування захватом, були обрані сервоприводи SR430, що мають менший момент, однак є достатніми для виконання функцій позиціонування та відкриття/закриття захоплювача (рис. 2.5, (аркуш [БРМА25.00.00.000ДІ2]) [31].



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд сервоприводу SR430

Технічні характеристики сервопривода SR430:

Робоча напруга: 6,0 – 7,4 В;

Швидкість: 0,18 с/60° при 6 В;

Момент: 4,2 кг·см при 6 В;

Швидкість: 0,16 с/60° при 7,4 В;

Момент: 5,3 кг·см при 7,4 В;

Кут обертання: 180°;

Габарити: 42 × 39,5 × 20,5 мм;

Вага: 44 г;

Шестерні: пластикові [31].

Таким чином, конфігурація сервоприводів була підібрана з урахуванням розподілу навантаження по осях маніпулятора. Потужні металопестерні приводи DF15RMG та RDS3115 забезпечують достатній момент для вертикального та горизонтального позиціонування ланок, а легкі SR430 - для операцій із меншим навантаженням, таких як керування захватом та обертання основи. Це дозволяє знизити загальну масу конструкції, зберігаючи функціональність і точність.

2.3 Технічні характеристики робота маніпулятора

Розроблений трьохосьовий маніпулятор призначений для виконання базових маніпуляцій у лабораторних, демонстраційних або навчальних цілях. Його конструкція поєднує простоту механічної реалізації з можливістю точного позиціонування у просторі. Основні технічні параметри маніпулятора наведено нижче.

Повторюваність: ±2 мм

Цей параметр визначає здатність маніпулятора повертатись до тієї самої позиції при багаторазовому виконанні одного і того ж руху. Значення в межах 2 мм є прийнятним для навчальних і легких маніпуляційних задач, де надвисока точність не є критичною. Такий рівень повторюваності досягається завдяки стабільності приводів і жорсткості конструкції.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Радіус дії: 570 мм

Максимальна довжина робочої зони маніпулятора становить 570 мм при повному розгинанні ланок. Цей радіус дозволяє обслуговувати відносно велику площу для невеликого настільного або підлогового пристрою, що дає змогу проводити сортування, переміщення об'єктів та виконання базових маніпуляцій на ділянці столу або стенду.

Діапазон переміщення: 180°

Кожна вісь маніпулятора здатна повертатись у межах 180 градусів. Це забезпечує достатній просторовий охоплюваний сектор для більшості завдань, включно з подачею предметів, позиціюванням у прямокутній зоні обслуговування та обертанням схвата.

Вантажопідйомність: 50–100 г

Маніпулятор здатний оперувати об'єктами масою до 100 грамів, що достатньо для демонстраційного захоплення дрібних предметів (наприклад, деталей типу гайок, мікроконтролерів, кульок, легких контейнерів). Діапазон вантажопідйомності залежить від кута нахилу ланок та розподілу маси відносно осі обертання, а також від режиму роботи сервоприводів.

Кількість контрольованих осей: 3

Маніпулятор має три ступені свободи, які реалізуються за рахунок обертання навколо вертикальної осі (основа), вертикального повороту плеча (перша ланка) і передпліччя (друга ланка). Така конфігурація дозволяє виконувати маніпуляції в площині з можливістю обслуговування секторної зони простору.

Вага: 775 г

Загальна маса маніпулятора з урахуванням сервоприводів, механічних ланок та захвата становить близько 775 грамів. Завдяки цьому конструкція є досить легкою та мобільною, що спрощує її установку, транспортування та використання в навчальному процесі.

Монтажне положення: на підлозі

Базове положення для встановлення маніпулятора — горизонтальна площина (підлога або горизонтальна частина столу). Конструкція основи дозволяє

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

надійно закріпити пристрій до поверхні за допомогою гвинтів або фіксаторів, забезпечуючи стійкість під час експлуатації.

Ці характеристики визначають можливості маніпулятора в межах типових завдань робототехнічного навчання та досліджень, і є основою для подальшого проектування електронної системи керування та програмного забезпечення.

2.4 Висновки до другого розділу

У другому розділі було здійснено поетапний аналіз і технічне обґрунтування вибору та компоновки електромеханічних складових трьохосового робота-маніпулятора, а також сформовано повне уявлення про його функціональну здатність у межах заданих умов експлуатації.

На підставі тривимірної CAD-моделі (рис. 2.1) була детально описана конструкція маніпулятора, що складається з основи, двох послідовно з'єднаних поворотних ланок та двопальцевого схвата. Конструктивно реалізовано три ступені свободи: обертання основи, поворот плеча та передпліччя, що дозволяє виконувати маніпуляції у вертикально-горизонтальній площині. Конфігурація з паралелограмною тягою забезпечує стабільну орієнтацію захватного органа під час переміщення, що є перевагою для керованого позиціонування.

У підрозділі 2.2 виконано розрахунок зусиль, які виникають на кінці маніпулятора при горизонтальному положенні ланок, і визначено максимальний момент, який повинен реалізовувати привід першої осі — 14,25 кг·см. З урахуванням цього були підібрані сервоприводи DF15RMG та RDS3115 для приводу ланок, а також легший SR430 для обертання основи й керування захватом. Усі обрані приводи мають відповідні технічні характеристики, що забезпечують точність, достатній момент і надійність роботи. Застосування металевих шестерень у відповідальних осях сприяє підвищенню зносостійкості конструкції.

У підрозділі 2.3 наведено систематизовані технічні характеристики маніпулятора, серед яких слід відзначити: повторюваність позиціонування ± 2 мм,

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

радіус дії 570 мм, вантажопідйомність до 100 г, тривісну конфігурацію управління та загальну масу конструкції 775 г. Такий набір характеристик є оптимальним для реалізації типових задач навчального і дослідницького характеру у сфері мехатроніки, автоматизації та програмованого керування.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРЬОХОСЬОВИМ РОБОТОМ МАНІПУЛЯТОРОМ

3.1 Розробка системи керування роботом маніпулятором на основі Arduino

3.1.1 Загальні відомості про Arduino Uno (рис.3.1)

Arduino Uno - це мікроконтролерна плата, створена на основі 8-бітного мікроконтролера ATmega328P, яка є однією з найвідоміших і найпоширеніших плат у сімействі Arduino (рис.3.1, аркуш [БРМА25.00.00.000ДІ2]) [32]. Вона розроблена для простого створення електронних прототипів та навчання основам мікроконтролерної техніки, автоматизації й робототехніки. Назва Uno (з італ. - «один») символізує першу версію платформи Arduino, яка була офіційно випущена у 2010 році під егідою відкритого проєкту з відкритим кодом і відкритою апаратною архітектурою.



Рисунок 3.1 – Arduino Uno

Arduino Uno є універсальним засобом для розробки систем автоматичного керування, збирання даних від сенсорів, реалізації алгоритмів логіки та управління виконавчими пристроями — від світлодіодів до сервомоторів, дисплеїв, модулів бездротового зв'язку та роботизованих комплексів.

Основні технічні характеристики Arduino Uno R3:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

- мікроконтролер: ATmega328P;
- тактова частота: 16 МГц (кварцовий резонатор 16 MHz);
- flash-пам'ять: 32 КБ, з яких 0,5 КБ використовується для завантажувача (bootloader);
- оперативна пам'ять SRAM: 2 КБ;
- постійна пам'ять EEPROM: 1 КБ для збереження даних між перезавантаженнями;
- цифрові входи/виходи (I/O): 14 штук, з яких 6 можуть використовуватись для широтно-імпульсної модуляції (ШИМ);
- аналогові входи: 6 каналів із роздільною здатністю 10 біт;
- інтерфейси: UART (послідовний порт), I²C (TWI), SPI;
- робоча напруга логіки: 5 В;
- живлення: через USB (5 В) або через роз'єм живлення (7–12 В рекомендовано);
- максимальний струм на один цифровий пін: 40 мА;
- розміри плати: приблизно 68,6 × 53,4 мм;

Маса: близько 25 г.

Особливості плати.

Вона оснащена USB-інтерфейсом для прямого підключення до ПК. Завдяки вбудованому UART-to-USB конвертеру (ATmega16U2), плата легко розпізнається як віртуальний COM-порт без додаткових драйверів.

Має роз'єм ICSP (In-Circuit Serial Programming) для програмування мікроконтролера за допомогою зовнішніх програматорів.

Присутній вбудований стабілізатор напруги, що дозволяє жити платі як від USB, так і від зовнішнього джерела напруги.

Arduino Uno підтримує програмне середовище Arduino IDE, яке дозволяє програмувати мікроконтролер мовами C/C++ із використанням спрощених бібліотек та шаблонів.

Застосування Arduino Uno:

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Arduino Uno використовується як у простих побутових задачах (наприклад, керування освітленням або температурою), так і в більш складних технічних розробках, таких як:

- автоматизовані метеостанції;
- системи розумного дому;
- 3D-принтери;
- роботи-маніпулятори;
- моделі промислових процесів;
- інтерактивні освітні установки.

Широка підтримка спільноти, велика кількість прикладів, бібліотек та навчальних матеріалів роблять Arduino Uno ідеальним вибором для навчання, наукових досліджень, а також швидкого прототипування систем автоматизації.

3.1.2 Електрична схема Arduino Uno R3 (рис.3.2) [33]

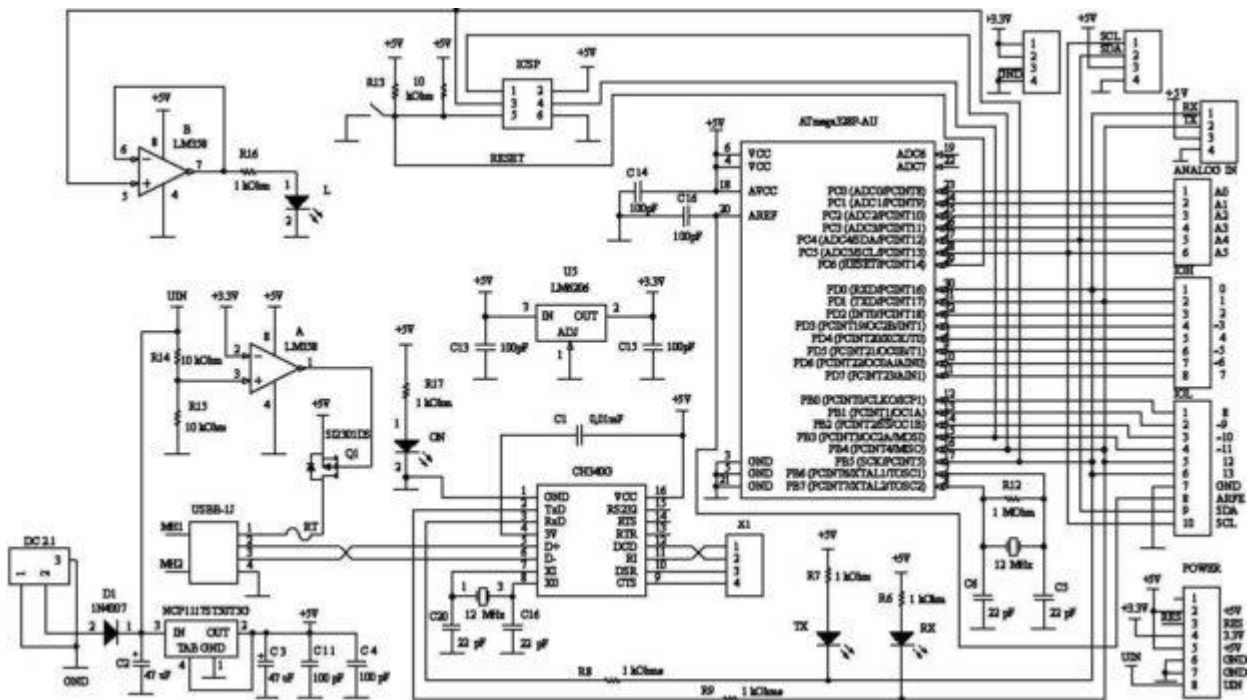
Електрична схема Arduino Uno R3, зображена на рисунку 3.2, ілюструє повну взаємодію між усіма ключовими компонентами плати: мікроконтролером ATmega328P, інтерфейсом USB-UART, елементами живлення, інтерфейсами введення/виведення, стабілізаторами напруги та допоміжними вузлами. Нижче надається її текстовий опис у структурованому вигляді.

Центральним елементом схеми є мікроконтролер ATmega328P-AU, який розміщений у правій частині. До нього підключено всі цифрові (PD0–PD7, PB0–PB5, PC0–PC5) та аналогові входи/виходи (ADC0–ADC5), які виведені на контакти плати Arduino. До виводів XTAL1 і XTAL2 мікроконтролера підключено кварцовий резонатор на 16 МГц із двома стабілізуювальними конденсаторами по 22 пФ. Це формує тактову частоту для роботи логіки контролера. Контакт RESET з'єднаний із кнопкою скидання, яка через резистор R2 підключена до живлення +5 В.

Схема живлення реалізована через кілька джерел: USB (через роз'єм USB-B) або зовнішнє джерело на роз'ємі DC-Jack. Напруга 7–12 В через діод D1

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

подається на стабілізатор NCP1117, який понижує її до 5 В. Окремий лінійний стабілізатор LP2985-33 (позначений як U5) формує напругу 3.3 В. Система автоматичного перемикавання джерел живлення реалізована за допомогою транзистора Q1 та діода Schottky (D1), які забезпечують подачу живлення до мікроконтролера в залежності від наявності USB або зовнішньої напруги. Конденсатори C1–C4 фільтрують живлення.



Рисунгк 3.2 - Електрична схема Arduino Uno R3

Передача даних між ПК та мікроконтролером здійснюється через мікросхему ATmega16U2, яка виконує роль USB-UART конвертера. Вона підключена до ліній USB через роз'єм USB-B та пов'язана з мікроконтролером ATmega328P через лінії TX і RX. ATmega16U2 також має свій кварцовий генератор (16 МГц) і конденсатори. Її можна програмувати через власний ISP-роз'єм. Конденсатор C5 у ланцюгу лінії DTR використовується для автоматичного скидання мікроконтролера під час програмування.

На схемі також зображені ICSP-роз'єми для програмування обох мікроконтролерів (ATmega328P та ATmega16U2) зовнішніми програматорами. Логічні рівні обох контролерів працюють при 5 В.

Світлодіоди TX, RX (індикація передавання та приймання даних), а також POWER LED підключені через обмежувальні резистори. Також передбачено користувачський світлодіод L, підключений до цифрового піну D13. Його можна використовувати для тестування роботи програми.

Інтерфейси SPI (пін 10, 11, 12, 13), I2C (A4, A5), UART (D0–D1), а також 6 аналогових входів (A0–A5) — усі ці порти підключені до мікроконтролера й виведені на відповідні роз'єми на платі. Також реалізовано піни живлення: 5V, 3.3V, GND, Vin, які слугують для підключення зовнішніх модулів і датчиків.

Таким чином, дана електрична схема демонструє повністю автономну та самодостатню платформу керування з підтримкою живлення, комунікацій і програмування. Вона забезпечує достатню функціональність для використання Arduino Uno як базової обчислювальної платформи в системах автоматичної роботи, робототехніки, сенсорики та навчання мікроконтролерному програмуванню.

3.1.3 Розробка системи керування роботом маніпулятором

Система керування маніпулятором реалізована на основі мікроконтролерної плати Arduino Uno, яка виконує функції центрального керувального пристрою. Плата підключена до персонального комп'ютера через інтерфейс USB (віртуальний COM-порт), що забезпечує одночасно передачу керуючих команд і живлення логічної частини Arduino (5 В). Через цей же канал здійснюється завантаження програмного коду та налагодження під час тестування системи.

До плати Arduino Uno підключено чотири цифрові сервоприводи, які забезпечують керування всіма ступенями свободи маніпулятора. Кожен сервопривод під'єднаний до окремого цифрового PWM-виводу Arduino, а саме до пінів D6, D8, D10 та D12, що вказано на рисунку 3.3 (аркуш

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

[БРМА25.00.00.000ДІЗ]). Ці виводи використовуються для формування широтно-імпульсних сигналів керування, які визначають кут повороту кожного актуатора.

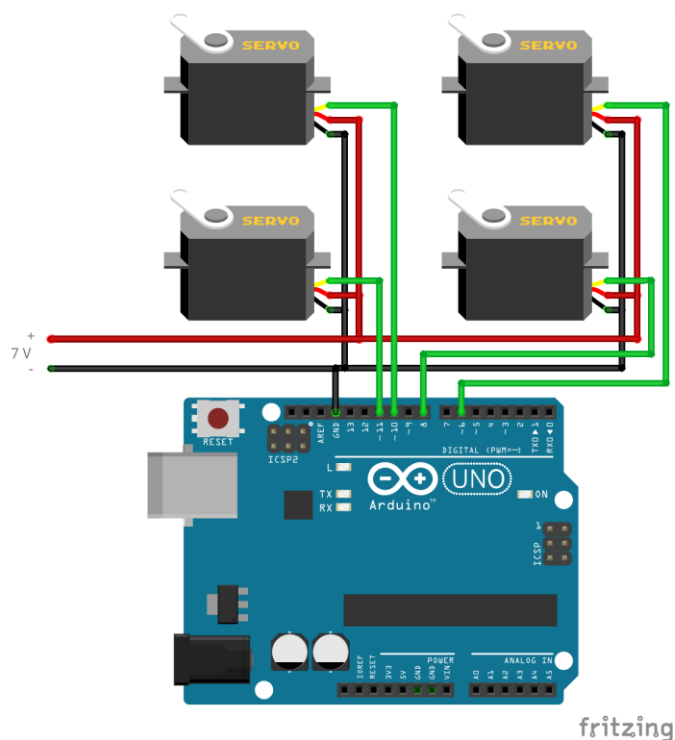


Рисунок 3.3 - Схема підключення сервоприводів до Arduino Uno

Оскільки сервоприводи споживають значний струм (особливо при максимальному моменті навантаження), їх живлення організовано від зовнішнього джерела постійного струму з номінальною напругою 7 В. Живлення подається паралельно до всіх сервоприводів з урахуванням сумарного струмового навантаження. При цьому загальний провід «землі» (GND) джерела живлення з'єднано з масою Arduino для забезпечення спільного потенціалу та коректного формування сигналів керування.

Призначення кожного сервопривода наведено нижче:

- Servo 0 — підключений до порту D6 та відповідає за обертання основи маніпулятора навколо вертикальної осі. Застосовується модель SR430 (рис. 3.3), яка забезпечує достатній крутний момент для позиціонування конструкції з мінімальним навантаженням;

- Servo 1 — підключений до порту D8, забезпечує керування першою ланкою (плече), яка здійснює вертикальні переміщення. Використовується модель

						БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			47

DF15RMG, що має підвищений момент і металеву передачу, необхідну для переміщення плечової частини під навантаженням;

- Servo 2 — підключений до порту D10, здійснює керування другою ланкою (передпліччя), відповідаючи за регіональні переміщення у вертикальній площині. Тут використано сервопривод RDS3115, який за характеристиками подібний до DF15RMG;

- Servo 3 — підключений до порту D12 та призначений для відкривання/закривання механічного захоплювача (схвата). Для цієї осі застосовується той самий привід SR430, оскільки вимоги до моменту невисокі.

На рисунку 3.4 (аркуш [БРМА25.00.00.000Е2]) наведена повна електрична схема підключення сервоприводів до плати Arduino Uno. Вона демонструє розведення PWM-сигналів до відповідних пінів, паралельне підключення до джерела живлення, з'єднання спільної землі та відповідність між логічною частиною та силовими компонентами. Така схема забезпечує надійне функціонування системи в умовах лабораторної або навчальної експлуатації.

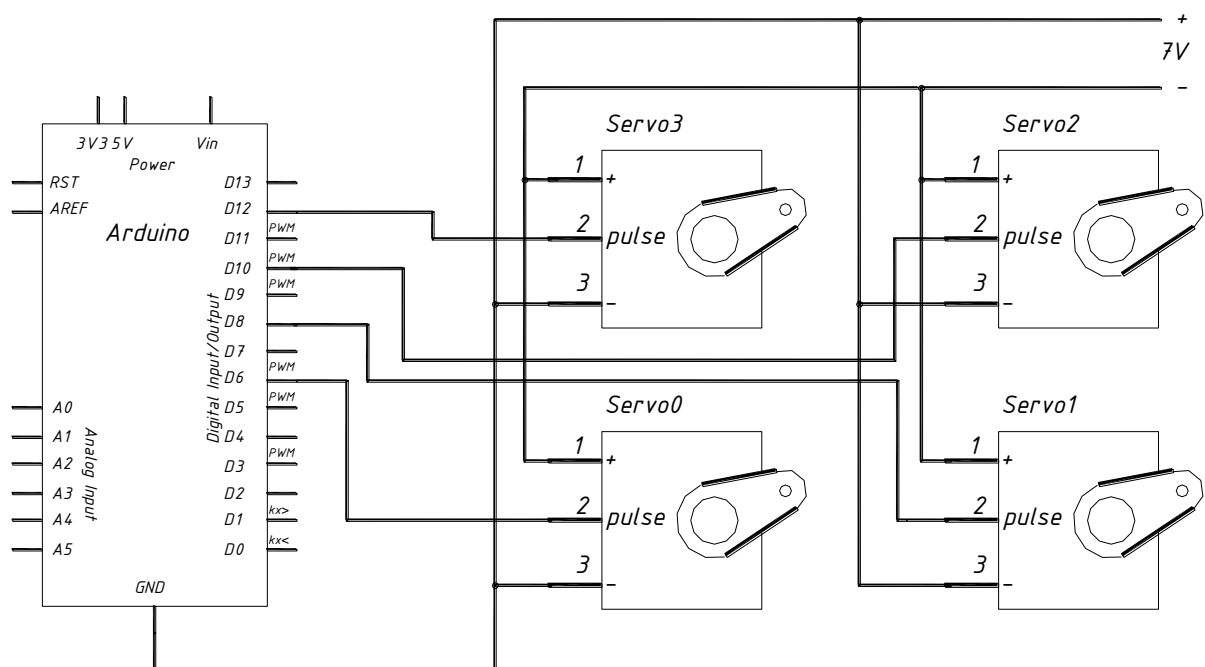


Рисунок 3.4 - Електрична схема підключення сервоприводів до контролера Arduino

Після підключення Arduino Uno до джерела живлення або комп'ютера по USB, автоматично запускається завантажена в неї програма (скетч), яка миттєво переходить до ініціалізації системи керування. На цьому етапі контролер передає керувальні PWM-сигнали на кожен із чотирьох сервоприводів, щоб встановити їх у початкові (нульові або задані) позиції. Це гарантує, що всі механічні вузли маніпулятора будуть перебувати в передбаченому стартовому положенні, мінімізуючи помилки позиціювання при подальшій роботі.

Після завершення ініціалізації система переходить у режим очікування керувальних команд. Програма постійно опитує COM-порт (послідовний UART-інтерфейс), перевіряючи, чи надійшли нові вхідні дані. Команди передаються у вигляді текстових рядків (ASCII-формату), які містять значення кутів повороту кожного сервоприводу у відповідній послідовності.

Після надходження чергового рядка Arduino:

- зчитує повний текстовий рядок із COM-порту;
- парсить дані — виділяє числові значення кутів;
- перетворює ці значення на відповідні широтно-імпульсні сигнали (PWM) для кожного сервоприводу;
- відправляє сигнали на відповідні пін-контакти D6, D8, D10, D12 (див. рис. 3.3), змінюючи положення ланок і схвата маніпулятора.

Цикл повторюється: після кожної обробки команди програма знову переходить у режим очікування наступної, забезпечуючи покрокове дистанційне керування положенням маніпулятора в реальному часі.

Спрощена блок-схема алгоритму роботи програми, реалізованої на мікроконтролері Arduino Uno, представлена на рис. 3.5 (аркуш [БРМА25.00.00.000ДІЗ]). Вона ілюструє послідовність базових етапів функціонування системи керування трьохосьовим маніпулятором.

Алгоритм починається з етапу перевірки наявності живлення. У разі відсутності живлення або під час очікування подачі напруги плата перебуває в пасивному стані. Як тільки живлення Arduino активується, система переходить до виконання наступних дій.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

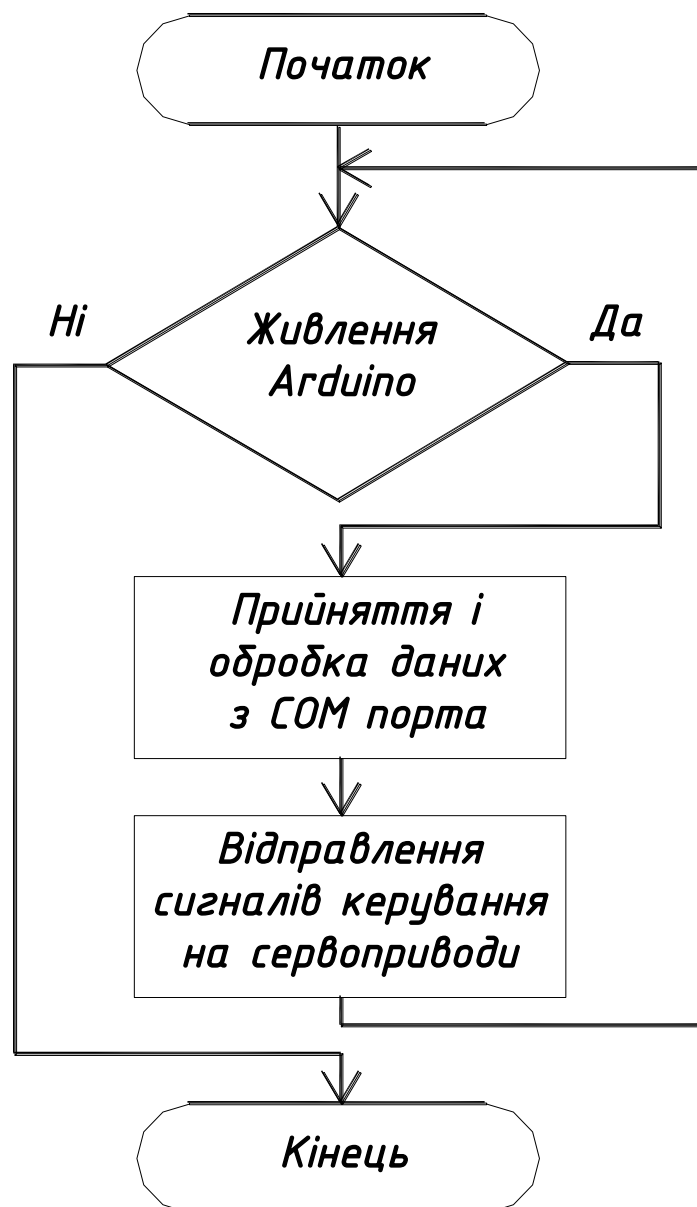


Рисунок 3.5 - Спрощена блок-схема програми Arduino

Після подачі напруги виконується автоматичний запуск прошитої програми, яка ініціалізує порти введення/виведення, а також встановлює сервоприводи у початкове положення. Далі програма переходить у режим опитування COM-порту (UART-інтерфейсу), через який від комп'ютера надходять текстові керувальні команди у вигляді рядків з числовими значеннями кутів.

На етапі «Прийняття і обробка даних з COM-порту» відбувається зчитування вхідної команди, її аналіз (парсинг рядка) та перевірка коректності

структури даних. Після цього здійснюється передача відповідних сигналів широтно-імпульсного керування (PWM) на кожен із сервоприводів згідно з отриманими параметрами кута.

Блок «Відправлення сигналів керування на сервоприводи» відповідає за зміну положення кожної з осей маніпулятора відповідно до нових команд. Цикл повторюється для кожного нового рядка даних, що надходить через СОМ-порт, забезпечуючи безперервне оновлення положення механічної частини пристрою.

Таким чином, блок-схема (рис. 3.5) демонструє циклічний характер обробки команд Arduino у режимі очікування/виконання, що є типовим для систем із покроковим дистанційним керуванням. Така архітектура дозволяє інтегрувати Arduino Uno в розширені системи автоматизації, а також забезпечує зручну взаємодію з програмним забезпеченням на ПК, у тому числі в рамках людино-машинного інтерфейсу (НМІ).

3.2 Розробка комп'ютерної програми для керування роботом маніпулятором

Розроблена комп'ютерна програма відіграє ключову роль у реалізації керування трьохосьовим роботом-маніпулятором. Вона виконує обчислення, трансформацію координат, генерацію команд управління та забезпечує інтерфейс взаємодії з користувачем. Програма написана мовою C# у середовищі Microsoft Visual Studio [34] і забезпечує двосторонній обмін даними з мікроконтролером Arduino Uno через послідовний СОМ-порт.

Програмне забезпечення має графічний інтерфейс користувача (GUI), що побудований у вигляді Windows Forms-додатка з логічно розподіленими панелями керування. Основні функціональні можливості програми охоплюють:

Ручне керування маніпулятором: користувач має змогу незалежно задавати кут повороту для кожного сервоприводу (поворот основи, плеча, передпліччя та схвата). Для цього на формі розміщено кнопки та повзунки, які дозволяють точно задавати значення кутів у межах допустимого діапазону.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Керування в декартовій системі координат (X, Y, Z): реалізовано обчислювальний модуль, що виконує зворотну кінематику — перетворення бажаної координати робочої точки у відповідні кути повороту сервоприводів. Це дає змогу користувачеві переміщати захоплювач у просторі без необхідності вручну обчислювати кути.

Керування швидкістю руху: програма дозволяє задавати швидкість переміщення ланок маніпулятора, змінюючи параметри затримки між імпульсами або частоту оновлення положень, що особливо важливо для плавності руху в автоматичному режимі.

Програмоване переміщення: передбачена можливість створення сценаріїв руху шляхом введення послідовності координат або положень у вигляді списку команд. Це дозволяє реалізувати автоматизовані цикли руху маніпулятора — наприклад, для демонстрації, сортування об'єктів або повторення дій у навчальних цілях.

Інтерфейс програми поділено на кілька функціональних панелей:

- панель ручного керування — набір кнопок або повзунків для покрокового керування кожною віссю та схватом у режимі прямого контролю;
- панель налаштування швидкості — дозволяє задати глобальну або індивідуальну швидкість для кожної осі;
- панель програмування маршруту — користувач може вказати координати точок у просторі, які маніпулятор повинен проходити. Також є функції старту, зупинки та повторення циклів руху.
- інформаційна панель — відображає поточний стан маніпулятора: координати робочої точки, кути повороту кожного сервоприводу, статус зв'язку з контролером тощо.

Передача команд Arduino відбувається через послідовний порт у вигляді текстових рядків із закодованими параметрами кутів. Програма постійно перевіряє зворотний зв'язок із Arduino, що дозволяє оперативно відслідковувати збої або втрату синхронізації.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Ця функція активується вручну, якщо плата Arduino була підключена після запуску програми. За замовчуванням програма виконує автоматичний пошук СОМ-портів при старті, однак ця кнопка дозволяє оновити список доступних портів у будь-який момент.

3 – вибір активного СОМ-порту.

Відображається назва СОМ-порту, з яким встановлено з'єднання. Зі списку можна вибрати інший активний порт, якщо Arduino було підключено до іншого інтерфейсу. Всі керувальні команди надсилаються саме на цей порт.

4 – повзунок керування швидкістю руху маніпулятора.

Дозволяє регулювати швидкість повороту сервоприводів. Чим вище встановлене значення, тим швидше виконується переміщення ланок і робочого органа.

5 – повзунок частоти оновлення команд.

Визначає, з якою частотою оновлюються дані, що передаються до Arduino. Команди надсилаються лише тоді, коли змінюється положення маніпулятора, що зменшує навантаження на СОМ-порт. Занадто висока частота може перевантажити канал зв'язку, особливо при одночасному русі декількох осей.

6 – стан системи.

У цьому текстовому полі виводиться інформація про поточний статус з'єднання та роботи програми: успішне підключення до порту, виникнення помилки передавання, вихід за межі робочої зони або зупинка програми. Це дозволяє швидко діагностувати проблеми під час роботи.

7 – панель ручного керування маніпулятором.

Містить два режими керування:

Режим «Кути» — дозволяє вручну керувати кожною віссю окремо. Кнопки зі стрілками відповідають за зміну кутів:

Q0 — поворот основи,

Q1 — поворот першої ланки (плеча),

Q2 — поворот другої ланки (передпліччя).

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Режим «Координати» — дозволяє переміщувати робочу точку маніпулятора в просторі за координатами X, Y, Z (у декартовій системі).

Усі кути відліковуються від нульового положення, коли всі ланки розташовані вертикально. Початок координат розташований у центрі основи на рівні підлоги (рис. 3.8).

Також у цій панелі передбачено керування схватом: параметр S задає ступінь розкриття (від 0 — повністю стиснутий до 90 — повністю відкритий).

Кнопка «Запуск» активує програму автоматичного керування. Передбачено три режими виконання:

- одноразове проходження програми до завершення;
- безперервне циклічне виконання всіх команд;
- виконання лише поточної (виділеної) команди.

Рисунок 3.7 демонструє приклад виконання програми. Під час автоматичної роботи ручне керування блокується, а в панелі стану з'являється інформація про активну команду та прогрес виконання. Якщо користувач натисне «Стоп», виконання призупиняється — програму можна продовжити з того ж місця. Якщо у паузі змінити положення маніпулятора вручну, то при відновленні виконання він автоматично повернеться до останньої збереженої позиції. Виділення іншої команди мишею призводить до негайного переходу до її виконання.

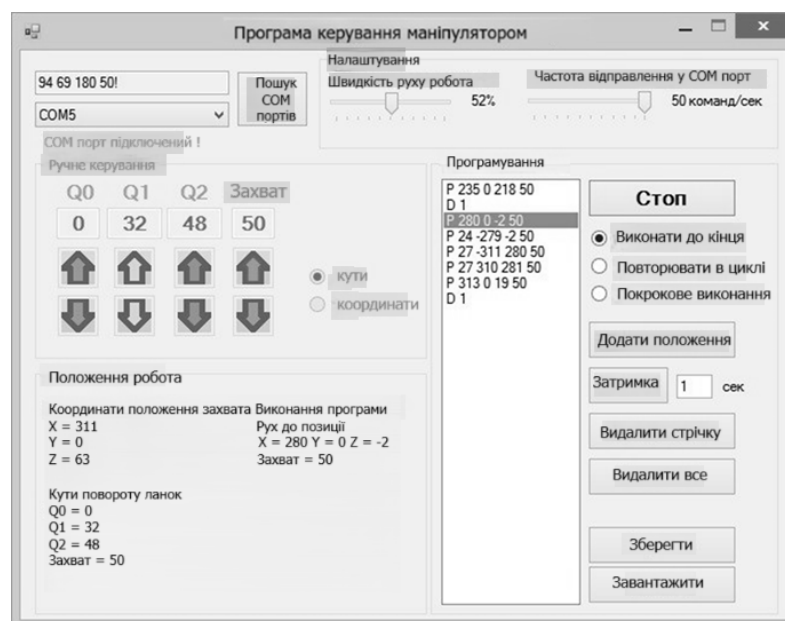


Рисунок 3.7 – Процес виконання програми

8 – Панель інформації.

Відображає актуальні дані про маніпулятор: значення кутів усіх ланок (Q_0 , Q_1 , Q_2), положення захвата (S), а також координати X , Y , Z робочої точки.

9 – Панель програмного керування.

Цей блок дає змогу створювати програму руху маніпулятора у вигляді послідовності команд:

- $P X Y Z S$ — вказує точку з координатами та ступенем розкриття захвата.
- $D T$ — команда затримки (delay) на T секунд перед виконанням наступної дії.

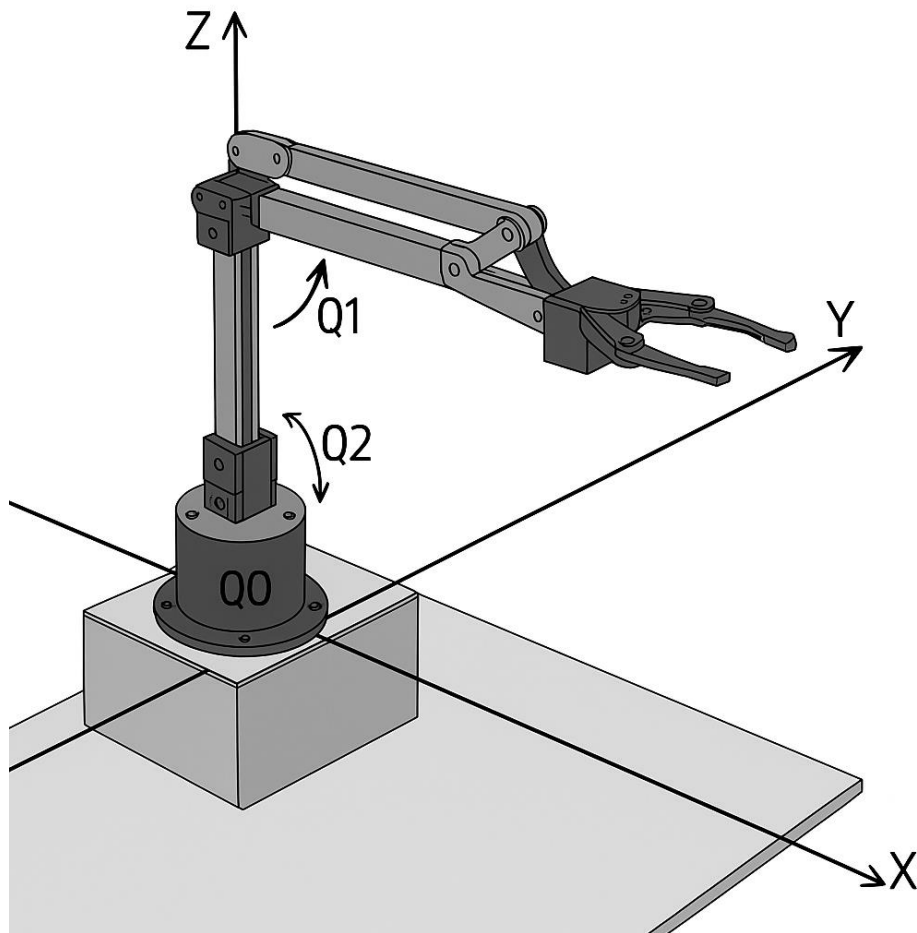


Рисунок 3.8 - Напрямок координатних осей робочої зони маніпулятора

У ручному режимі користувач може навести маніпулятор у потрібну позицію й натиснути кнопку «Додати положення» — програма автоматично згенерує відповідну команду P . Команду затримки додають через кнопку

										Арк.
										56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

«Затримка», з указанням часу в секундах. Усі команди відображаються у текстовому полі у порядку виконання.

Створену програму можна зберегти у файл .txt або завантажити з диску для подальшого редагування. Вона повністю доступна для ручної модифікації. Якщо у програмі вказані некоректні або неіснуючі команди — вони будуть автоматично проігноровані під час виконання, не перериваючи процесу.

На рисунку 3.9 зображено спрощену структурну блок-схему комп'ютерної програми для керування трьохосьовим маніпулятором. Схема відображає логічну архітектуру системи, де стрілками позначено взаємозв'язки між функціональними модулями та напрямки передачі даних.

Центральним елементом є основна підпрограма керування, яка координує роботу всіх режимів: ручного керування в кутових координатах, керування за положенням (X, Y, Z) та програмованого управління. У режимі керування кутами користувач задає кути повороту окремих ланок маніпулятора (Q0, Q1, Q2), після чого програмний модуль виконує пряму задачу кінематики — обчислює просторове положення робочої точки (кінцевого виконавчого органа) на основі заданих кутів.

У випадку перемикання на режим керування координатами, програма використовує останнє обчислене положення робочої точки як початкову умову та дозволяє змінювати її положення в просторі. Для цього розв'язується обернена задача кінематики, яка полягає у визначенні нових значень кутів повороту кожної ланки, що забезпечують досягнення заданих координат. Розраховані кути передаються в модуль формування команд, де створюється рядок даних у відповідному форматі (наприклад, "Q0 Q1 Q2 S") та надсилається через COM-порт на плату Arduino для подальшого керування сервоприводами.

У режимі програмного керування програма виконує послідовність задалегідь сформованих інструкцій, які містять або координати положення (команди типу P X Y Z S), або затримки (D T). Для кожної команди з координатами також розв'язується обернена задача кінематики, після чого

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

3.3 Тестування робота маніпулятора

Тестування функціональності трьохосьового маніпулятора охоплює перевірку цілісності та коректності взаємодії апаратної та програмної частини системи керування. Зокрема, оцінюються: стабільність комп'ютерної програми, її зв'язок із контролером Arduino, правильність підключення сервоприводів згідно електричної схеми (рис. 3.3), а також відповідність поведінки маніпулятора заданій програмі руху.

Першочергово здійснюється апаратне з'єднання компонентів. Сервоприводи підключаються до цифрових портів Arduino відповідно до конфігурації, наведеної на рис. 3.3, після чого Arduino під'єднується до персонального комп'ютера через USB-інтерфейс (COM-порт). Після подачі живлення на систему, сервоприводи автоматично переходять у початкові позиції, встановлені у програмі прошивки контролера. Візуально це відповідає приведенню ланок маніпулятора у вертикальне або нейтральне положення (рис. 3.10, аркуш [БРМА25.00.00.000ДІ5]).

Після запуску комп'ютерної програми керування на екрані з'являється повідомлення «COM-порт підключений!», що свідчить про успішне встановлення зв'язку з платою Arduino. Для первинної перевірки правильності підключення сервоприводів проводиться тестування в ручному режимі керування — по черзі активуються кнопки, які відповідають за обертання кожної з ланок та схвата. Очікується, що кожна кнопка викликає відповідну реакцію на стороні виконавчого механізму. Всі перевірені серводвигуни успішно реагують, що підтверджує правильність їх апаратного підключення.

Додатково була протестована відмова зв'язку — з метою перевірки стійкості програми. Під час активної сесії було навмисно відключено Arduino від USB-порту. Програма коректно вивела повідомлення «COM-порт не підключений!», і маніпулятор залишився у поточному положенні без здійснення подальших дій, що свідчить про правильну обробку помилок. Після повторного підключення, при натисканні кнопки «Пошук COM-портів», програма

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ідентифікує доступний порт і відновлює з'єднання, що дозволяє продовжити роботу без перезапуску.



Рисунок 3.10 - Початкове положення маніпулятора

У режимі ручного керування за координатами здійснюється переміщення робочої точки маніпулятора вздовж осей X, Y, Z. Під час кожного руху автоматично розв'язується обернена задача кінематики, яка дозволяє синхронізовано керувати всіма ланками так, щоб точка переміщувалась строго вздовж заданої осі. Це забезпечує високу точність позиціонування у просторі та узгоджений рух конструкції.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Під час тестування були зафіксовані невеликі вібраційні ефекти та ривки при зміні положення, особливо на малих кутах. Це пояснюється обмеженнями точності самих сервоприводів — зокрема, при зміні кута на 1° або менше, деякі приводи можуть не реагувати через механічний зазор або недостатню чутливість. Незважаючи на це, з програмного боку Arduino надсилає сигнали з кроком $0,01^\circ$, тобто програмна точність залишається високою, хоча апаратна реалізація має фізичні обмеження.

Програмне управління було протестоване шляхом створення послідовності команд. Для цього у ручному режимі маніпулятор переміщувався у необхідні точки простору, після чого ці позиції фіксувалися натисканням кнопки «Додати положення». Програма автоматично формувала інструкції типу P X Y Z S, а також додавалися команди затримки D T, які забезпечували паузи між рухами.

Після формування повної послідовності команд було натиснуто кнопку «Запуск». Маніпулятор почав виконувати рух згідно з усіма заданими позиціями, затримуючись у потрібних точках згідно з інструкціями. Під час виконання програми тестувалась можливість динамічного регулювання швидкості, що підтвердило гнучкість системи керування.

Усі тести підтвердили працездатність як апаратної, так і програмної частини системи. Маніпулятор адекватно реагує на керуючі команди, а програмна частина демонструє стабільну роботу в умовах нормальної експлуатації та під час імітації збоїв зв'язку. Це свідчить про правильну архітектуру системи та ефективну реалізацію механізмів зворотного зв'язку та обробки помилок.

3.4 Висновки до третього розділу

У результаті виконання робіт, описаних у третьому розділі, було повністю реалізовано комплексну систему керування трьохосьовим маніпулятором, яка охоплює апаратну частину на базі мікроконтролера Arduino Uno, відповідне електронне підключення сервоприводів, а також розробку комп'ютерного програмного забезпечення для інтерфейсної та логічної взаємодії з пристроєм.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

У підпункті 3.1 проведено детальний аналіз платформи Arduino Uno, її електричної схеми (рис. 3.2) та архітектури підключення сервоприводів (рис. 3.3–3.4). Обґрунтовано вибір моделі мікроконтролера та конкретних сервомоторів для кожної осі маніпулятора. Представлено алгоритм керування, реалізований у вигляді блок-схеми (рис. 3.5), який демонструє стабільну послідовність опрацювання вхідних команд, формування сигналів широтно-імпульсного керування та ініціалізації системи.

У підпункті 3.2 описано створену комп'ютерну програму, що побудована у середовищі C# (рис. 3.6–3.9). Вона дозволяє здійснювати ручне та автоматизоване керування маніпулятором, перемикатися між режимами за кутами або координатами, зберігати сценарії руху, а також взаємодіяти з користувачем через зручний інтерфейс із контролем стану системи. Здійснено впровадження зворотної та прямої кінематики, реалізовано управління швидкістю та підтримку передачі команд у реальному часі через COM-порт.

У підпункті 3.3 проведено експериментальне тестування роботи маніпулятора. Було перевірено: правильність апаратного підключення та ініціалізації сервоприводів; надійність зв'язку з Arduino; стійкість до втрати з'єднання з подальшим відновленням роботи; коректність розв'язання оберненої кінематичної задачі для руху вздовж координатних осей; реалізацію автоматичного керування на основі створених команд типу P X Y Z S та D T.

Встановлено, що система працює стабільно, виконує рухи з достатньою точністю, а апаратно-програмна взаємодія реалізована надійно. Незначні вібрації під час руху пов'язані з обмеженнями точності недорогих сервоприводів і не впливають критично на роботу системи.

Узагальнюючи, можна зробити висновок, що створена система є функціонально завершеним, надійним і адаптованим рішенням для лабораторного використання, демонстраційних цілей і початкового вивчення робототехнічних систем із трьома ступенями свободи.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи досягнуто поставлену мету — розроблено повнофункціональну систему керування трьохосьовим роботом-маніпулятором, що включає технічне проектування, створення апаратного забезпечення на основі Arduino Uno, розробку програмного забезпечення та експериментальне тестування. Отримані результати свідчать про працездатність, надійність і ефективність запропонованого рішення для навчальних, демонстраційних і дослідницьких задач у сфері робототехніки.

У теоретичній частині проаналізовано класифікацію роботів, структуру та принципи побудови маніпуляторів, а також засоби програмування систем керування. Визначено переваги трьохосьових конструкцій для реалізації базових операцій із позиціювання та переміщення, а також обґрунтовано доцільність використання мови C++ і мікроконтролерних платформ у навчальному середовищі.

У конструкторській частині роботи змодельовано та описано тривісний маніпулятор з базовою конфігурацією, що забезпечує керування обертанням основи, переміщенням плеча і передпліччя та керуванням захватом. Розрахунки моментів навантаження дозволили обґрунтовано підібрати сервоприводи з необхідними параметрами. У підсумку було досягнуто оптимальне поєднання конструкційної простоти, точності позиціювання та надійності.

У третьому розділі здійснено розробку електронної схеми підключення, написання програми для Arduino та створення графічного інтерфейсу користувача на C#. Забезпечено підтримку різних режимів керування — як у кутовому просторі, так і в декартових координатах. Реалізовано алгоритми прямої та оберненої кінематики, гнучке управління швидкістю, зберігання програм руху та їх відтворення в автоматичному режимі. Проведене тестування підтвердило стабільність роботи системи, її стійкість до збоїв зв'язку та здатність точно виконувати задані рухи.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Таким чином, створена система демонструє можливість реалізації доступного та ефективного робототехнічного комплексу на основі відкритих апаратних і програмних рішень. Вона може бути використана для викладання дисциплін, пов'язаних з мехатронікою, автоматизацією, основами програмування робіт, а також як база для подальших досліджень з інтеграції датчиків, розширення ступенів свободи або впровадження машинного зору.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Автоматизація виробництва [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F_%D0%B2%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%82%D0%B2%D0%B0.

2. ABB Robotics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://new.abb.com/products/robotics>.

3. Products & Solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kuka.com/>.

4. Yaskawa [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.yaskawa.eu.com/>.

5. Solutions for automation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.universal-robots.com/>.

6. AI & Robotics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.tesla.com/AI>.

7. Автоматизація виробництва в усіх галузях [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.fanuc.eu/ua/uk/%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%B4%D0%BB%D1%8F-%D0%B0%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%97-%D0%B2%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%82%D0%B2%D0%B0>.

8. Foxconn [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Foxconn>.

9. Magician Robot [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.dobot-robots.com/products/education/magician.html>.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Niryo One [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://niryo.com/niryo-one-accessible-robot-open-source/>.

11. Festo Didactic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.festo.com/ua/uk/e/tiekhnichna-osvita-id_3776/.

12. LEGO Education [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://education.lego.com/en-us/>.

13. Робототехніка [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B0>.

14. Трет'як А.В. Основи робототехніки: навчальний посібник для студентів спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування», 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А.В. Трет'як, А.М. Кльон. – Полтава, видавництво національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. – 135 с.

15. Робот [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82>.

16. Аніщенко М. В. Промислові роботи [Електронний ресурс] : навч. посібник / М. В. Аніщенко ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Електрон. текст. дані. – Харків : НТУ "ХП", 2025. – 464 с.

17. Михайлов Є. П. Навчальний посібник з дисципліни "Маніпулятори та промислові роботи" : для студентів бакалаврів / Є. П. Михайлов, В. М. Лінгур ; Одес. нац. політехн. ун-т. - Одеса, 2019. - 233 с.

18. Поліщук М. М. Робототехнічні системи та комплекси: мобільні роботи довільної орієнтації: підруч. для студ. спец. «Інформаційні системи та технології» / М. М. Поліщук, М. М. Ткач; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 14,7 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 301с.

19. <https://concertproject.eu/> [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://concertproject.eu/>.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

20. Промислові роботи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://kafav.tntu.edu.ua/index.php/mn-abiturient/mn-articles/676-art-industrial-robots#rob_drv.
21. Захарова В.І., Васильєва М.П. Промислові роботи. – М., 1998.
22. Робототехніка. Підручник / [В. І. Костюк, Г. О. Спину, Л. С. Ямпольський, М. М. Ткач.] – К.: Вища школа. – 1994. – 447 с.
23. Цвіркун Л.І. Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. / Л.І. Цвіркун, Г. Грулер ; під заг. ред. Л.І. Цвіркуна ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 3-тє вид., переробл. і доповн. – Дніпро: НГУ, 2017. – 224 с.
24. Сонячний трекер на arduino на дві вісі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.tsatu.edu.ua/ea/wp-content/uploads/sites/27/1-sonjachnyj-treker-vdovyn-dyordyev-kashkarev.pdf>.
25. Тепловізор на Arduino [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://vt-tech.eu/articles/electronic/239-thermocamera-arduino.html#google_vignette
26. Що можна зробити на Arduino? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://bitkit.com.ua/shho-mozhna-zrobiti-na-arduino?srsltid=AfmBOop2zg-Yphj_DPGGIOT-FX_bvYeiFV9NOkLUO_qLQ6yGrwaWeHLc.
27. Уроки програмування на C++ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://acode.com.ua/uroki-po-cpp/>.
28. Програмування на асемблер [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://foxminded.ua/programmirovanie-na-assemblere/>.
29. Tilt Kit DF15RMG [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://let-elektronik.dk/df15rmg-tilt-kit-20kg>.
30. Сервопривід RDS3115 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://bigl.ua/ua/p2541792797-servoprivod-rds3115-360>.
31. SR430 Digital Servo [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.rhydolabz.com/sr430-digital-servo-with-layshaft-5.3kg.cm>.
32. Плата Arduino Uno R3 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://arduinokit.com.ua/ua/p1137698825-plata-arduino-uno.html?source=merchant_center&gad_source=1&gad_campaignid=20370416385&g_braid=0AAAAAp9UBpaEyIlix47P8wC7GDGtQGonL&gclid=CjwKCAjw6s7CBhACE

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

iwAuHQckgImwq7mA19-

eIRSK8bp_zMRowHTSyq6BB7pGjldAxrtfqTQhyFK9BoCPL4QAvD_BwE.

33. Arduino UNO - популярна плата розробки [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://itmaster.biz.ua/directory/kits-nabory/arduino-uno.html>.

34. Середовище розробки Microsoft Visual Studio [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://learn.ztu.edu.ua/mod/page/view.php?id=9974>.

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

ДОДАТОК А

					БРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69