

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «Розробка автоматизованої системи керування
роботизованим маніпулятором для використання в медичних
лабораторіях»**

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології
(назва)

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело*

Омелько Яна
(підпис) (ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Виконав: здобувач вищої освіти група ІСД-41

Омелько Яна
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник
к.т.н., доцент

Валентина ДАЛЬНИЧЕНКО
(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:
к.т.н., доцент

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти . бакалавр

Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма Інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедрою ІСТ

Каміла СТОРЧАК

“ ____ ” _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Омелько Яні Вікторівні

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Розробка автоматизованої системи керування роботизованим маніпулятором для використання в медичних лабораторіях

керівник кваліфікаційної роботи: Валентина ДАЛЬНИЧЕНКО, доцент

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від “ ____ ” лютого 2026 р. №

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «01» червня 2026 р.

3. Вихідні дані кваліфікаційної роботи:

- 1) Принципи роботи роботизованих маніпуляторів
- 2) Методи керування (мікроконтролери, приводи)
- 3) Основи програмування та моделювання
- 4) Науково-технічна література

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

1. Аналіз тенденцій лабораторної автоматизації та обґрунтування вибору кінематичної схеми маніпулятора.
2. Математичне моделювання прямої кінематики маніпулятора KS0198 4DOF.
3. Проектування та програмно-апаратна реалізація алгоритмів плавного керування на базі мікроконтролера.
4. Експериментальне дослідження точності позиціонування та техніко-економічне обґрунтування проекту.

5.Перелік ілюстраційного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання « 20 » лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір технічної літератури	24.02-03.03.26	
2.	Аналіз основних можливостей та технологій ІоТ	04.03-17.03.26	
3.	Дослідження концепції цифрового двійника.	18.03-31.03.26	
4.	Проектування та впровадження цифрових двійників в промислові процеси.	01.04-24.04.26	
5.	Висновки по роботі	25.04-16.05.26	
6.	Розробка демонстраційних матеріалів, доповідь.	19.05-20.05.26	
7.	Оформлення бакалаврської роботи	21.05-30.05.26	

Здобувач вищої освіти .

Яна ОМЕЛЬКО

(підпис)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник кваліфікаційної роботи .

Валентина ДАЛЬНИЧЕНКО

(підпис)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці автоматизованої системи керування роботизованим маніпулятором, призначеної для застосування в медичних лабораторіях. Актуальність теми зумовлена зростаючою потребою охорони здоров'я в точних, відтворюваних і безпечних процедурах обробки біологічних зразків, де людський фактор залишається основним джерелом помилок та контамінації.

Обсяг роботи становить 72 сторінки, 8 рисунків, 12 таблиць, 25 джерел, 2 додатки. Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого керування роботизованим маніпулятором у середовищі медичної лабораторії. методи, алгоритми та програмні засоби системи керування маніпулятором KS0198 4DOF на базі платформи Arduino UNO R3.

Метою роботи розробка автоматизованої системи керування роботизованим маніпулятором KS0198 4DOF, що забезпечує точне та плавне позиціонування захоплювача для виконання типових лабораторних операцій із підтримкою трьох методів керування та функцією запам'ятовування позицій.

У роботі проведено теоретичний огляд роботизованих маніпуляторів, їх класифікацію та порівняльний аналіз кінематичних схем. Обґрунтовано вибір маніпулятора articulated/артикульованого типу (KS0198 4DOF) для застосування в умовах медичної лабораторії. Побудовано математичну модель кінематики. Розроблено алгоритм плавної інтерполяції на базі полінома п'ятого ступеня та розширену функцію пам'яті позицій. Верифікацію проведено натурним експериментом; повторюваність позиціонування склала $\pm 0,4$ мм.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: РОБОТИЗОВАНИЙ МАНІПУЛЯТОР, КІНЕМАТИКА, SCARA, KEYESTUDIO KS0198, ARDUINO UNO R3, СЕРВОПРИВОД, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, МЕДИЧНА ЛАБОРАТОРІЯ, ТРАЄКТОРНЕ ПЛАНУВАННЯ, ПОЛІНОМ П'ЯТОГО СТУПЕНЯ.

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього ступеня магістр

здобувачки вищої освіти Омелько Яни Вікторівни

(прізвище, ім'я, по батькові)

на тему: «Автоматизована система керування роботизованим маніпулятором для медичної лабораторії»

Актуальність:

Автоматизація рутинних операцій у клініко-діагностичних лабораторіях є актуальним науково-практичним завданням. Ручна обробка біологічних зразків залишається основним джерелом систематичних помилок, зумовлених людським фактором, обмеженою точністю дозування та ризиком перехресної контамінації. Впровадження роботизованих маніпуляторів на базі доступних мікроконтролерних платформ дозволяє суттєво підвищити відтворюваність і безпечність лабораторних процедур за прийнятної вартості реалізації. Тема роботи є своєчасною та практично значущою.

Позитивні сторони.

1. Зміст кваліфікаційної роботи магістра повністю відповідає завданню, поставлені задачі виконані у повному обсязі.
2. Проведено кількісний порівняльний аналіз кінематичних схем за методом зважених оцінок, що переконливо обґрунтовує вибір SCARA-конфігурації KS0198.
3. Розроблено та реалізовано алгоритм плавної інтерполяції руху на основі полінома п'ятого ступеня, що дозволило зменшити похибку позиціонування у 3,0 рази порівняно з базовим програмним забезпеченням виробника.
4. Реалізовано три незалежні канали керування (дротовий джойстик, Bluetooth HC-06, PS2-контролер) та функцію пам'яті до 10 позицій, що забезпечує зручність практичного застосування системи.
5. Виконано ґрунтовне техніко-економічне обґрунтування та аналіз охорони праці; результати натурного експерименту підтверджено кількісними показниками.

Недоліки:

1. Досягнута точність позиціонування $\pm 0,42$ мм (2σ) є достатньою для маніпуляцій із стандартними мікропробірками, однак для роботи з мікропланшетами формату 384-лунки (крок між лунками 4,5 мм) може виявитися недостатньою. Рекомендується додатково оцінити цей сценарій.
2. У роботі не розглянуто зворотну задачу кінематики (ІК), що обмежує можливості програмування траєкторій у декартових координатах. Доцільно було б окреслити перспективи її реалізації для подальшого розвитку системи.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи магістра та можуть бути усунені у подальших дослідженнях.

Висновок: кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістр заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Омелько Яна Вікторівна – заслуговує присвоєння кваліфікації: «магістр з інформаційних систем та технологій».

Рецензент:

(підпис)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

ПОДАННЯ ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

Направляється здобувач Омелько Я.В. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 126 Інформаційні системи та технології

(код, найменування спеціальності)

освітньо-професійної програми Інформаційні системи та технології

На тему: «Розробка автоматизованої системи керування роботизованим маніпулятором для використання в медичних лабораторіях».

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Катерина НЕСТЕРЕНКО
(підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Омелько Яна Вікторівна обрала тему кваліфікаційної роботи, метою якої була розробка автоматизованої системи керування роботизованим маніпулятором KS0198 4DOF, що забезпечує точне та плавне позиціонування захоплювача для виконання типових лабораторних операцій із підтримкою трьох методів керування та функцією запам'ятовування позицій. Під час виконання кваліфікаційної роботи Омелько Я.В. Показала добру теоретичну та практичну підготовку, вміння вирішувати самостійно питання та проводити дослідження. Робота виконана сумлінно та вчасно за планом.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Омелько Я.В. на оцінку «_____» та присвоїти їй кваліфікацію бакалавр з інформаційних систем та технологій.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Валентина ДАЛЬНИЧЕНКО
(підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)
“ ”

_____ 2026 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Омелько Я.В. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри Інформаційних систем та технологій
(назва)

СТОРЧАК

_____ Каміла
(підпис)
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИЗОВАНИХ МАНІПУЛЯТОРІВ	10
1.1 Поняття та структура роботизованого маніпулятора.....	10
1.2 Класифікація маніпуляторів за кінематичною схемою.....	12
1.2.1 Декартові маніпулятори	12
1.2.2 Циліндричні маніпулятори	13
1.2.3 Сферичні (полярні) маніпулятори.....	13
1.2.4 SCARA-маніпулятори	14
1.2.5 Антропоморфні маніпулятори.....	14
1.2.6 Паралельні маніпулятори.....	15
1.3 Математичний апарат опису кінематики (метод ДН)	15
1.3.1 ДН-параметри.....	15
1.3.2 Матриця однорідного перетворення.....	16
1.3.3 Пряма та обернена кінематика	16
1.4 Принципи керування сервоприводами у маніпулятора.	17
2 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ І ВИБІР ТИПУ МАНІПУЛЯТОРА	19
2.1 Критерії вибору маніпулятора для медичної лабораторії.....	19
2.1.1 Технічні вимоги.....	19
2.1.2 Санітарно-гігієнічні та безпекові вимоги.....	19
2.1.3 Економічні та організаційні вимоги	20
2.2 Порівняльний аналіз кінематичних схем.....	21
2.3 Огляд існуючих рішень та аналогічних продуктів.....	23
2.4 Обґрунтування вибору маніпулятора KS0198 4DOF	25
2.4.1 Технічне обґрунтування	25
2.4.2 Кінематична модель KS0198	25
2.4.3 Обмеження та заходи щодо їх подолання	26
3 РОЗРОБКА І РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.	27
3.1 Апаратна реалізація системи	27

3.1.1 Плата керування Arduino UNO R3	30
3.1.2 Покроковий збір маніпулятора.....	30
3.1.3 Джерело живлення.....	33
3.2 Алгоритми керування та програмна реалізація	34
3.2.1 Архітектура firmware.....	34
3.2.2 Алгоритм плавної інтерполяції (poly5)	37
3.2.3 Функція пам'яті позицій (Teach-and-Playback)	38
3.3 Верифікація та результати натурного експерименту	41
3.3.1 Методика вимірювання	41
3.3.2 Результати та аналіз.....	41
3.4 Техніко-економічне обґрунтування	43
3.4.1 Варіанти реалізації та їх порівняння.....	43
3.4.2 Кошторис витрат.....	48
3.4.3 Висновок щодо економічної ефективності	44
3.5 Охорона праці.....	45
3.5.1 Аналіз небезпечних факторів	45
3.5.2 Організаційні та технічні заходи безпеки	45
ВИСНОВКИ	47
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	49
ДОДАТОК А. Лістинг системи керування.....	51
ДОДАТОК Б. Специфікація компонентів системи.....	62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АСК – автоматизована система керування
- ПІД – пропорційно-інтегрально-диференційний (регулятор)
- ШІМ – широтно-імпульсна модуляція
- МК – мікроконтролер
- SCARA – Selective Compliance Assembly Robot Arm
- ЗЗ – зворотний зв'язок
- ДС – датчик стану
- ПК – персональний комп'ютер
- USB – Universal Serial Bus
- UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
- ДОФ – ступені свободи (degrees of freedom)
- ISO – International Organization for Standardization

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток системи охорони здоров'я ставить високі вимоги до точності, відтворюваності та безпеки лабораторних процедур. Клініко-діагностичні лабораторії є критично важливою ланкою в медичній діагностиці: за даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), понад 70% клінічних рішень приймаються на основі результатів лабораторних досліджень. Водночас ручна обробка біологічних зразків персоналом залишається головним джерелом систематичних помилок, зумовлених втому, обмеженою точністю дозування та високим ризиком перехресної контамінації чи біомедичних ризиків для самих працівників.

Автоматизація рутинних операцій за допомогою роботизованих маніпуляторів є ефективним шляхом вирішення цієї проблеми. Застосування робототехнічних комплексів на базі відкритих мікроконтролерних платформ дозволяє створювати гнучкі та функціональні системи для переміщення лабораторного посуду за низької собівартості, що робить їх доступними для впровадження у лабораторіях малого та середнього типів.

Проте базове програмне забезпечення бюджетних маніпуляторів (зокрема, платформ типу MeArm) зазвичай реалізує лише дискретне (покрокове) керування сервоприводами. Це призводить до виникнення значних динамічних навантажень, різких рухів, ривків та залишкових вібрацій під час руху ланок маніпулятора. За умов транспортування лабораторного посуду з рідкими біоматеріалами такі коливання є неприпустимими, оскільки вони створюють загрозу пошкодження ємностей або розпліскування речовин. Таким чином, модернізація алгоритмів керування, інженерно-математичне обґрунтування вибору кінематичної схеми, забезпечення плавності траєкторій руху та створення систем енергонезалежного позиціонування лабораторних маніпуляторів є актуальним науково-практичним завданням.

Зв'язок роботи з науками програмами, планами, темами. Роботу виконано відповідно до наукових напрямів кафедри [Впишіть назву вашої кафедри] [Впишіть назву вашого університету] в межах досліджень із автоматизації,

робототехніки та впровадження мікропроцесорних систем у медичну практику.

Мета: дослідження: Метою кваліфікаційної роботи є розробка, програмно-апаратна реалізація та інженерно-математичне обґрунтування автоматизованої системи керування роботизованим маніпулятором, оптимізованої за критеріями плавності та точності для безпечного виконання маніпуляцій із лабораторним посудом в умовах медичної лабораторії.

Завдання дослідження: Для досягнення поставленої мети було сформувано та вирішено такі завдання:

1. Дослідити теоретичні основи функціонування роботизованих маніпуляторів, їх класифікацію.
2. Провести кількісний порівняльний аналіз кінематичних схем.
3. Побудувати математичну модель прямої кінематики маніпулятора.
4. Розробити та інтегрувати у прошивку (firmware) мікроконтролера ATmega328P алгоритм плавної інтерполяції руху.
5. Реалізувати багатоваріантну систему керування.

Об'єкт дослідження – процес автоматизації лабораторних маніпуляцій з біологічними зразками за допомогою роботизованих систем.

Предмет дослідження – методи, алгоритми кінематичного аналізу, плавного інтерполяційного керування та траєкторного позиціонування маніпулятора KS0198 4DOF на базі контролера Arduino UNO (ATmega328P).

Методи дослідження. Для розв'язання визначених завдань у роботі використано: методи системного та порівняльного аналізу (із ваговими коефіцієнтами) — для вибору кінематичної схеми; математичний апарат параметрів Денавіта–Хартенберга — для розв'язання прямої задачі кінематики; методи обчислювальної математики — для побудови інтерполяційного полінома п'ятого ступеня; методи натурного експериментального тестування та статистичного аналізу (критерій sigma) — для оцінки точності та повторюваності позиціонування виконавчого органу.

Наукова новизна одержаних результатів. Отримала подальший науково-практичний розвиток алгоритму траєкторного керування малогабаритними роботами-маніпуляторами MeArm-архітектури (зокрема SCARA-орієнтованого

типу). Новизна полягає в синергетичному поєднанні методу покрокового навчання системи (запису позицій в енергонезалежну пам'ять) та математичного алгоритму плавної інтерполяції кутових переміщень сервоприводів за поліномом п'ятого ступеня. Це дозволило мінімізувати динамічні вібрації виконавчого механізму та покращити точність повторюваності позиціонування у 3,0 раза порівняно зі стандартними заводськими алгоритмами дискретних затримок.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено та виготовлено діючий прототип системи керування лабораторним маніпулятором KS0198 на базі доступної компонентної бази (мікроконтролер ATmega328P, бездротові модулі). Створене програмне забезпечення реалізує три альтернативні методи керування та функцію енергонезалежної пам'яті до 10 позицій. Система є готовим економічно доцільним рішенням для автоматизації переміщення пробірок і мікропланшетів у лабораторіях малого та середнього типу з метою підвищення якості досліджень.

Апробація результатів роботи. Основні результати та наукові положення бакалаврської роботи доповідалися та обговорювалися на науково-практичних конференціях:

1. VII Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасний стан та перспективи розвитку IoT” (м. Київ, 2025 р.). Тема доповіді: “Розробка системи керування роботизованим маніпулятором KS0198 4DOF для автоматизації лабораторних маніпуляцій із біологічними зразками”.
2. Всеукраїнська науково-технічна конференція “Технології цифрового розвитку: програмні системи та децентралізація” (м. Київ, 2025 р.). Тема доповіді: “Алгоритм плавної інтерполяції руху на основі полінома п'ятого ступеня для мікроконтролерних платформ Arduino”

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИЗОВАНИХ МАНІПУЛЯТОРІВ

1.1 Поняття та структура роботизованого маніпулятора

Роботизований маніпулятор – це керована механічна система, призначена для переміщення об'єктів, виконання технологічних операцій або взаємодії з навколишнім середовищем шляхом відтворення рухів, функціонально аналогічних рухів людської руки. Відповідно до стандарту ISO 8373:2021 «Robotics – Vocabulary», маніпулятор визначається як «механізм, як правило, з кількома ступенями свободи, що виконує рухи, аналогічні тим, що можуть бути виконані людиною».

Будь-який промисловий або навчальний маніпулятор складається з кількох взаємопов'язаних функціональних підсистем. Механічна підсистема включає несучу конструкцію (раму), ланки (links) і суглоби (joints), що утворюють кінематичний ланцюг. Актуаторна підсистема забезпечує руховий привід суглобів: електричні двигуни постійного струму, кроковики або сервоприводи. Сенсорна підсистема здійснює вимірювання стану системи: датчики положення, швидкості, зусилля. Система керування отримує команди від оператора або програми і перетворює їх на сигнали для актуаторів з урахуванням зворотного зв'язку від сенсорів.

Ключовим поняттям теорії маніпуляторів є ступінь свободи (СС, англ. DOF – Degree of Freedom) – незалежний параметр конфігурації, що описує один «вимір» руху системи. Кожен суглоб додає один або кілька ступенів свободи. Для більшості практичних задач переміщення та орієнтації у тривимірному просторі необхідні шість ступенів свободи (три для позиції і три для орієнтації). Маніпулятори з меншою кількістю ступенів свободи є кінематично надлишковими для певних напрямків і підходять для задач із обмеженим класом переміщень.

Суглоби маніпуляторів поділяються на два основні типи. Обертальний суглоб (revolute joint, R) забезпечує відносне обертання двох суміжних ланок

навколо загальної осі і описується одним кутовим параметром θ_i . Поступальний суглоб (prismatic joint, P) забезпечує лінійне переміщення вздовж спільної осі і описується лінійним параметром d_i . Комбінація типів суглобів визначає кінематичну схему і основні властивості маніпулятора.

Важливою характеристикою є робочий простір (workspace) – множина точок тривимірного простору, досяжних для центру захоплювача маніпулятора. Форма і розміри робочого простору визначаються кінематичною схемою і розмірами ланок. Розрізняють досяжний робочий простір (reachable workspace) і робочий простір з орієнтацією (dexterous workspace), де захоплювач може набувати довільної орієнтації.

З точки зору конструктивного виконання маніпулятор являє собою відкритий кінематичний ланцюг, утворений послідовно з'єднаними ланками та суглобами. Ланки виконують роль жорстких несучих елементів, що передають зусилля і переміщення від одного суглоба до іншого. Суглоби ж забезпечують відносний рух суміжних ланок: обертальні суглоби реалізують кутові переміщення, поступальні – лінійні. Виконавчий орган (захоплювач або інструмент), закріплений на кінцевій ланці, безпосередньо взаємодіє з об'єктами у робочому просторі.

Захватний пристрій – це кінцевий ефектор маніпулятора, безпосередньо відповідальний за утримання та переміщення об'єктів. Залежно від форми і матеріалу об'єктів хватні пристрої поділяють на механічні (важільні, паралельні, трипальцеві), вакуумні (на основі вакуумних чашок) та магнітні. Для медичних лабораторій оптимальними є механічні паралельні захоплювачі з керованим зусиллям стиску, що запобігає деформації скляного посуду та пробірок. Маніпулятор KS0198 4DOF оснащений дволанковим акриловим захоплювачем, керованим одним сервоприводом, що цілком відповідає вимогам переміщення стандартного лабораторного посуду.

Привід суглобів є одним із ключових факторів, що визначають динамічні характеристики маніпулятора. Електричні приводи (сервомотори, крокові двигуни) є найбільш поширеними завдяки точності, компактності та простоті інтеграції в систему керування. Зокрема, мікросервоприводи типу 9g, застосовані

у маніпуляторі KS0198 4DOF, забезпечують крутний момент близько 1,5 кг·м при живленні 5 В та кут повороту до 180°. Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) з частотою 50 Гц є стандартним інтерфейсом керування такими приводами і безпосередньо підтримується платою Arduino UNO R3 через апаратні ШІМ-виходи.

1.2 Класифікація маніпуляторів за кінематичною схемою

Кінематична схема є найбільш фундаментальною характеристикою маніпулятора, що визначає форму робочого простору, механічну жорсткість конструкції, складність задачі керування та придатність для різних типів завдань. Існує кілька усталених кінематичних схем промислових маніпуляторів.



Рис. 1.1 Класифікація роботизованих маніпуляторів

1.2.1 Декартові маніпулятори

Декартові маніпулятори (гантрі-роботи, X,Y,Z-системи) мають кінематичний ланцюг типу PPP (три поступальні суглоби), що забезпечує

переміщення уздовж трьох взаємно перпендикулярних осей. Кожна координата декартового простору безпосередньо відповідає одній поступальній осі, що робить пряму та обернену кінематику тривіальними: декартові координати цільової точки є одночасно узагальненими координатами. Робочий простір — прямокутний паралелепіпед.

Переваги: максимальна механічна жорсткість при порталному виконанні (опора осей з обох боків); рівномірنا точність позиціонування по всьому робочому простору; проста система керування; легка калібровка. Недоліки: великі габарити відносно розмірів робочого простору; висока рухома маса, що обмежує динамічні характеристики; складне обходження перешкод у робочій зоні.

Типові застосування у лабораторіях: системи рідинної обробки (liquid handling robots) компаній Hamilton і Tecan для завантаження мікропланшетів; порталні координатно-вимірювальні машини.

1.2.2 Циліндричні маніпулятори

Циліндричні маніпулятори мають кінематичну схему RPP (обертання + два поступальні суглоби). Робоча зона є порожнім циліндром або його сектором. Забезпечують добрий доступ усередину циліндричних просторів і природний рух навколо центральної осі, проте вимагають складнішої системи керування порівняно з декартовою. У сучасних промислових застосуваннях використовуються рідко.

1.2.3 Сферичні (полярні) маніпулятори

Сферичні маніпулятори (схема RRP) мають два обертальні і один поступальний суглоб. Робочий простір – порожня сфера або її частина. Представлені ранніми промисловими роботами Unimate (Unimation, 1961). У

сучасних системах практично витіснені SCARA і антропоморфними конфігураціями через складнішу кінематику і нерівномірну точність позиціонування.

1.2.4 SCARA-маніпулятори

SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) – конфігурація, запропонована японським інженером Хіроші Макіно у 1978 році спеціально для задач складання електронних компонентів. Стандартна схема RRPR: три паралельні вертикальні обертальні осі та одна поступальна вертикальна вісь. Назва відображає ключову конструктивну ідею: висока жорсткість у вертикальному напрямку (виключна для складальних операцій, де деталі вставляються вертикально) за умови м'якості в горизонтальній площині.

Переваги SCARA: природна жорсткість до вертикальних навантажень; висока швидкість горизонтальних переміщень (400–800 мм/с у промислових зразках); компактний горизонтальний слід; відносно проста аналітична обернена кінематика; висока повторюваність позиціонування. Недоліки: обмежена орієнтаційна свобода захоплювача (4 ступені свободи замість 6); наявність особливих положень (сингулярностей).

1.2.5 Антропоморфні маніпулятори

Антропоморфні (шестиосьові, RRR...R) маніпулятори відтворюють кінематику людської руки і забезпечують повну орієнтаційну свободу захоплювача (6 ступенів свободи). Широко застосовуються у зварюванні, фарбуванні та складних монтажних операціях (ABB IRB, FANUC M-серії, KUKA KR-серії).

Переваги: максимальна гнучкість і маневреність; можливість роботи в обмежених просторах зі складними траєкторіями.

Недоліки: висока складність оберненої кінематики (множинні рішення, сингулярності Pieper); висока вартість; складна система керування; для простих задач «pick and place» є надлишковими.

1.2.6 Паралельні маніпулятори

Паралельні маніпулятори (Delta, Stewart platform) мають декілька кінематичних ланцюгів, що паралельно з'єднують нерухому основу з рухомою платформою. Основна перевага – надвисокі прискорення (до 15 g) завдяки малій масі рухомих елементів. Застосовуються у харчовій і фармацевтичній промисловості для швидкого сортування та пакування. Недоліки: малий робочий простір; складна кінематика; висока вартість.

1.3 Математичний апарат опису кінематики (метод ДН)

Для систематичного математичного опису кінематики маніпуляторів широко використовується метод однорідних перетворень Денавіта–Хартенберга (ДН), запропонований у 1955 році. Метод встановлює стандартну процедуру призначення локальних систем координат для кожної ланки і визначає чотири геометричні параметри, що повністю характеризують відносне положення і орієнтацію суміжних ланок.

1.3.1 ДН-параметри

Для кожної пари суміжних ланок $i-1$ та i визначаються:

- a_i – довжина ланки: відстань між осями Z_{i-1} та Z_i вздовж спільного перпендикуляра (осі X_i);
- α_i – кут закрутки ланки: кут між осями Z_{i-1} та Z_i при обертанні навколо X_i ;

- d_i – зміщення по суглобу: відстань між спільними перпендикулярами до Z_{i-1} вздовж осі Z_{i-1} ;
- θ_i – кут суглоба: кут між спільними перпендикулярами при обертанні навколо Z_{i-1} .

Для обертового суглоба θ_i є змінною (узагальненою координатою), решта — фіксовані. Для поступального суглоба d_i є змінною.

1.3.2 Матриця однорідного перетворення

Матриця однорідного перетворення від системи координат ланки $i-1$ до ланки i записується у стандартній формі DH:

$${}_{i-1}T_i = \text{Rot}(z, \theta_i) \cdot \text{Trans}(z, d_i) \cdot \text{Trans}(x, a_i) \cdot \text{Rot}(x, \alpha_i)$$

Матриця є добутком чотирьох елементарних перетворень і має розмірність 4×4 . Повна матриця прямої кінематики від основи до захоплювача є добутком матриць для усіх n ланок: $T = T_1 \cdot T_2 \cdot \dots \cdot T_n$.

1.3.3 Пряма та обернена кінематика

Пряма кінематика (Forward Kinematics, FK) вирішує задачу: за відомими узагальненими координатами $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ знайти положення і орієнтацію захоплювача у базовій системі координат. Задача FK завжди має єдине розв'язання і обчислюється як добуток матриць DH.

Обернена кінематика (Inverse Kinematics, IK) вирішує зворотну задачу: за заданими положенням і орієнтацією захоплювача знайти відповідні узагальнені координати. Задача IK значно складніша: може мати множинні розв'язання, жодного розв'язання (для точок поза робочим простором) або вимагати чисельних методів у загальному випадку. Для маніпуляторів зі спеціальними кінематичними структурами (зокрема SCARA) існують замкнені аналітичні

розв'язання.

1.4 Принципи керування сервоприводами у маніпуляторах

Сервопривод (servo motor) є основним виконавчим органом суглоба маніпулятора. На відміну від звичайного двигуна постійного струму, сервопривод містить вбудовану систему керування положенням із зворотним зв'язком від датчика кута (потенціометра або енкодера). Це дозволяє задавати бажаний кут повороту безпосередньо, без необхідності проєктувати зовнішній регулятор положення.

Стандартні RC-сервоприводи (зокрема, мікросервоприводи 9G, що використовуються у KS0198) керуються через ШІМ-сигнал з частотою 50 Гц. Тривалість імпульсу у межах 1000–2000 мкс відповідає куту повороту від 0° до 180°. Середнє значення 1500 мкс відповідає 90°. Бібліотека Servo.h у середовищі Arduino IDE автоматично виконує перетворення: виклик `servo.write(angle)` генерує відповідний ШІМ-сигнал без участі програміста.

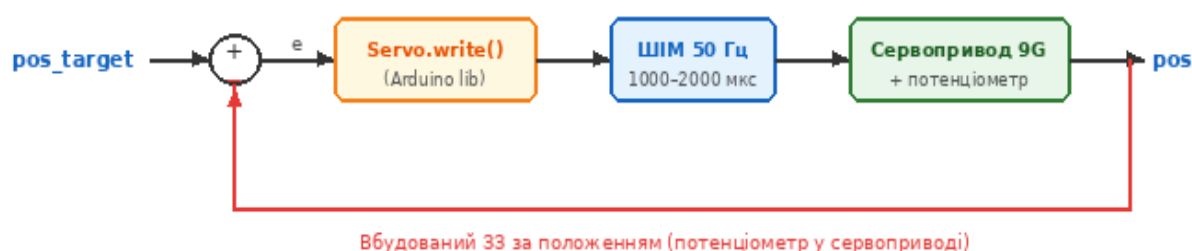


Рис. 1.2 Структура замкненого контуру керування сервоприводом 9G

На рисунку 1.2 показано структуру контуру керування сервоприводом. Вхідний сигнал – цільовий кут `pos_target`, що задається функцією `Servo.write()`. Бібліотека `Servo.h` перетворює кут у тривалість ШІМ-імпульсу. Сервопривод, отримавши імпульс, порівнює його тривалість з поточним положенням

потенціометра і обертає вал двигуна до усунення розбіжності. Цей внутрішній контур регулювання є пропорційним і дуже швидким (час відгуку ~ 100 мс). Зовнішня система керування (Arduino) формує послідовність значень `pos_target` у часі — тобто виконує траєкторне планування.

Ключовим параметром для траєкторного планування є максимальна кутова швидкість сервоприводу, що для мікросервоприводів 9G при живленні 4,8 В становить близько $600^\circ/\text{с}$ ($0,1$ с/ 60°). Перевищення цієї швидкості у послідовності команд призводить до того, що сервопривод «не встигає» і фактична траєкторія відхиляється від заданої.

2 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ І ВИБІР ТИПУ МАНІПУЛЯТОРА

2.1 Критерії вибору маніпулятора для медичної лабораторії

Медична лабораторія є специфічним середовищем, яке висуває до роботизованих систем ряд вимог, що суттєво відрізняють їх від загальнопромислових застосувань. Перед проведенням порівняльного аналізу необхідно визначити та ранжувати критерії вибору.

2.1.1 Технічні вимоги

Точність і повторюваність позиціонування є першочерговими вимогами. Стандартний мікропланшет формату 96-well має відстань між центрами лунок 9 мм, діаметр лунки 6–7 мм. Для надійного потрапляння наконечника дозатора у лунку необхідна повторюваність позиціонування не гірше ± 2 мм. Для роботи зі стандартними мікропробірками Eppendorf (діаметр 10–11 мм) достатня точність ± 1 мм.

Робочий простір повинен охоплювати зону стандартного лабораторного столу або модуля. Типовий модуль із стійкою для пробірок (40 лунок у форматі 8×5) займає площу близько 150×100 мм. Таким чином, необхідний робочий простір — не менше 200×200 мм.

Вертикальний рух необхідний для опускання і підняття захоплювача або піпетки при захваті пробірки. Необхідний вертикальний хід: не менше 100 мм.

Швидкість переміщення впливає на пропускну здатність лабораторії. Для рутинних операцій достатній час одного циклу «захват–переміщення–відпускання» — близько 5–10 секунд, що відповідає швидкості 200–300 мм/с.

2.1.2 Санітарно-гігієнічні та безпекові вимоги

Матеріали конструкції, що контактують із зразками або потрапляють у зону їх обробки, повинні бути хімічно стійкими до спиртових дезінфектантів (70% ізопропанолу) і допускати щоденне протирання. Акрил (ПММА), що використовується у KS0198, стійкий до більшості лабораторних дезінфектантів за умови уникнення кетонів і хлорованих розчинників.

Маніпулятор не повинен генерувати частинки (пил, стружку), що могли б контамінувати зразки. Рухомі металеві деталі повинні бути захищені кожухами або розміщені поза зоною обробки зразків.

2.1.3 Економічні та організаційні вимоги

Вартість є критичним обмежувальним фактором для більшості лабораторій. Комерційні лабораторні роботи (Tecan Fluent, Hamilton VANTAGE) коштують від 30 000 до 200 000 EUR, що є недоступним для більшості дослідницьких і навчальних лабораторій. Бюджет для DIY-рішення, розробленого в рамках кваліфікаційної роботи, – до 5 000 грн.

Простота обслуговування: система повинна допускати ремонт і заміну компонентів силами лабораторного персоналу без спеціальних інструментів або інженерної кваліфікації.

Гнучкість і програмованість: система повинна дозволяти легку перенастройку на нові протоколи без необхідності механічних переналаштувань.

Критерії вибору маніпулятора та їх вагові коефіцієнти Таблиця 2.1

Критерій	Ваговий коефіцієнт w	Обґрунтування
Точність/повторюваність	0,25	Ключова для лабораторних операцій
Вартість (доступність)	0,20	Обмежений бюджет лабораторій
Компактність	0,15	Обмежений простір на столі
Простота керування	0,15	Персонал без інж. підготовки
Швидкість переміщення	0,15	Пропускна здатність лабораторії
Хімічна стійкість матеріалів	0,10	Протирання дезінфектантами
СУМА	1,00	

2.2 Порівняльний аналіз кінематичних схем

На основі визначених критеріїв проведено кількісний порівняльний аналіз п'яти основних кінематичних схем. Кожна схема оцінюється за шкалою від 1 до 5 балів за кожним критерієм. Результати зведено у таблицю 2.2.,

Порівняльна матриця кінематичних схем маніпуляторів

Таблиця 2.2

Критерій	Декартова	Циліндрична	SCARA (KS0198)	Антропо- морфна	Паралельна	Вага w
Точність/повторюваність	4	3	4	3	5	0,25
Вартість (доступність)	3	3	5	2	2	0,20
Компактність	2	3	4	3	5	0,15
Простота керування	5	4	4	2	2	0,15
Швидкість переміщення	3	3	5	4	5	0,15
Хімічна стійкість матеріалів	4	3	4	3	3	0,10
Зважена оцінка $\Sigma(w_i \cdot b_i)$	3,40	3,15	4,30	2,75	3,50	

На основі визначених критеріїв проведено кількісний порівняльний аналіз п'яти основних кінематичних схем. Кожна схема оцінюється за шкалою від 1 до 5 балів за кожним критерієм. Результати зведено у таблицю 2.2.



Рис. 2.1 Порівняльна радарна діаграма кінематичних схем маніпуляторів

Аналіз таблиці 2.2 та рисунка 2.1 показує, що для умов медичної лабораторії найвищу зважену оцінку отримала SCARA-конфігурація (4,30 балів). Декартова схема, незважаючи на просту кінематику і прийнятну точність, поступається через низьку компактність — критичну обставину при розміщенні на обмеженому просторі лабораторного столу. Паралельна схема, хоча й займає друге місце (3,50 бали), практично недоступна за вартістю у DIY-форматі. Антропоморфна схема отримала найнижчу оцінку (2,75) через складну кінематику і відносно низьку доступність.

Перевага SCARA-конфігурації для медичних лабораторій пояснюється кількома чинниками. Висока жорсткість у вертикальному напрямку є надзвичайно важливою для операцій вертикального введення наконечника у лунку планшету або пробірку. Компактний горизонтальний слід дозволяє розмістити маніпулятор на стандартному лабораторному столі без перешкод для роботи персоналу. Відносно проста аналітична обернена кінематика знижує обчислювальне навантаження на МК і зменшує час відгуку системи. Нарешті, значна кількість доступних DIY-рішень SCARA-типу забезпечує низьку вартість і широку підтримку.

2.3 Огляд існуючих рішень та аналогічних продуктів

Для більш повного обґрунтування вибору проведено порівняльний огляд конкретних продуктів — як комерційних, так і DIY-рішень, доступних на ринку.

Порівняльна характеристика існуючих рішень

Таблиця 2.3

Назва системи	Тип/ДОФ	Точність	Вартість	Платформа	Обмеження
Tecan Fluent	Декарт./3	$\pm 0,1$ мм	>50 000 EUR	Фірмова	Недоступна ціна, закрите ПЗ
Hamilton STAR	Декарт./3	$\pm 0,2$ мм	>30 000 EUR	Фірмова	Недоступна ціна, закрите ПЗ
Opentrons OT-2	Декарт./3	$\pm 1,0$ мм	~4 500 USD	Python/Linux	Немає захоплювача, тільки рідини
uArm Swift Pro	SCARA/4	$\pm 0,2$ мм	~300 USD	Arduino/Python	Немає в продажу, висока ціна
AR2/AR3 Annin	Антроп./6	$\pm 0,5$ мм	~1 500 USD	Arduino/Python	Складна кінем., крокові двигуни
MeArm Pi	SCARA/4	$\pm 2,0$ мм	~50 USD	Raspberry Pi	Менша жорсткість, Pi – дорожчий
KS0198 (цей проект)	SCARA/4	$\pm 0,4$ мм	~2 000 грн	Arduino UNO	Навчальний клас точності

Порівняння таблиці 2.3 демонструє, що KS0198 займає унікальну нішу: єдине доступне за ціною SCARA-рішення з прийнятною точністю для навчальних і дослідницьких застосувань. Найближчий аналог — MeArm Pi — поступається за жорсткістю конструкції і точністю.

2.4 Обґрунтування вибору маніпулятора маніпулятор KS0198 4DOF

На основі проведеного аналізу обґрунтовано вибір маніпулятора KS0198 4DOF як оптимального рішення для реалізації автоматизованої системи керування в умовах медичної лабораторії.

2.4.1 Технічне обґрунтування

Маніпулятор KS0198 реалізує вертикальну артикульовану кінематику, що є різновидом SCARA-конфігурації. Конструкція MeArm-типу з акрилових пластин товщиною 3 мм забезпечує достатню механічну жорсткість для маніпулювання об'єктами масою до 100 г (типові мікропробірки Eppendorf об'ємом 2 мл з вмістом масою 40–60 г).

Чотири ступені свободи є оптимальними для лабораторних задач типу «pick and place» над горизонтальною площиною: обертання навколо вертикальної осі (орієнтація в горизонтальній площині), підйом/опускання (вертикальний рух), розгортання нижньої ланки (досяжність у горизонтальній площині) і захоплювач (захват об'єкта). Шість ступенів свободи антропоморфного маніпулятора для цих задач є надлишковими і невиправдано збільшують складність і вартість системи.

Платформа Arduino UNO R3 (ATmega328P, 16 МГц) із платою розширення TB6612FNG забезпечує достатню обчислювальну потужність для виконання усіх необхідних алгоритмів (обернена кінематика, траєкторне планування, ШІМ-генерація) у межах 20-мс циклу керування.

2.4.2 Кінематична модель KS0198

Маніпулятор KS0198 має такі кутові діапазони суглобів: Servo 1 (обертання основи, пін A1): 0° – 180° , початкове 80° ; Servo 2 (права рука, пін A0):

0°–180°, початкове 60°; Servo 3 (ліва рука, пін D6): 35°–180°, початкове 130°; Servo 4 (захоплювач, пін D9): 2°–108°, початкове 0°.

Положення центру захоплювача у базовій системі відліку виражається через кути суглобів: $x = (L_1 \cdot \cos \theta_2 + L_2 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cdot \cos \theta_1$; $y = (L_1 \cdot \cos \theta_2 + L_2 \cdot \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cdot \sin \theta_1$; $z = h_0 + L_1 \cdot \sin \theta_2 + L_2 \cdot \sin(\theta_2 + \theta_3)$, де L_1, L_2 – довжини верхньої та нижньої акрилових ланок, h_0 – висота першого суглоба.

2.4.3 Обмеження та заходи щодо їх подолання

KS0198 має ряд обмежень, характерних для навчальних DIY-маніпуляторів: нижча жорсткість акрилових ланок порівняно з металевими аналогами; відсутність апаратних кінцевих вимикачів (обмеження реалізовані програмно); нижча точність порівняно з промисловими SCARA-маніпуляторами. Всі ці обмеження є прийнятними для цільового застосування (навчальна/дослідницька лабораторія), де критичною є відтворюваність позиціонування, а не абсолютна точність.

Як показано у розділі 3, розроблений алгоритм плавної інтерполяції на базі полінома 5-го ступеня дозволяє зменшити вібрації та підвищити повторюваність позиціонування у 3 рази порівняно з базовим кодом виробника.

3 РОЗРОБКА І РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Апаратна реалізація системи

Апаратна частина системи керування маніпулятором KS0198 4DOF. Центральний елемент – Arduino UNO R3 з мікроконтролером ATmega328P (16 МГц, 32 кБ flash, 2 кБ SRAM). На Arduino встановлена плата розширення TB6612FNG Motor/Servo Drive Shield (VIN 7–15 В, 5 В/3 А вихід, розміри 73×53,34 мм).



Рис. 3.1 Маніпулятор маніпулятор KS0198 4DOF у зібраному вигляді

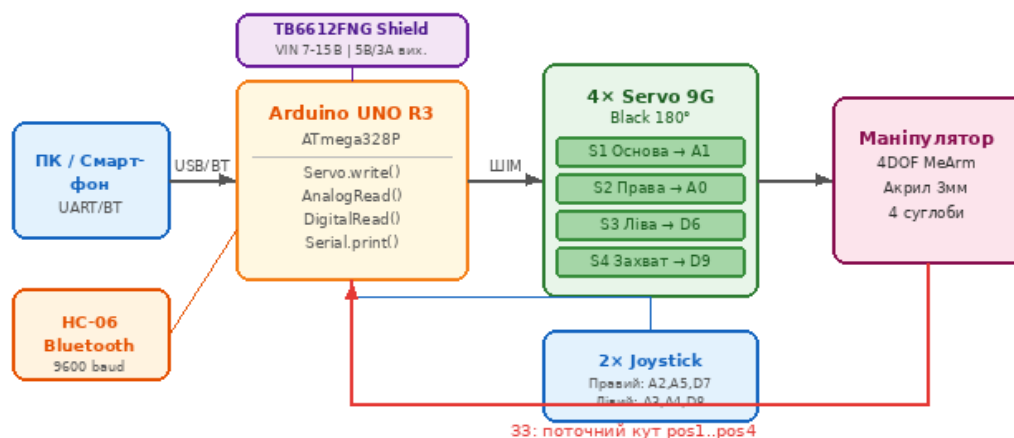


Рис. 3.2 Структурна схема апаратного комплексу системи керування маніпулятором

Чотири мікросервоприводи типу 9G Black 180° встановлені у суглобах маніпулятора. Усі чотири сервоприводи ідентичні. Схема підключення сервоприводів до плати розширення: Servo 1 (основа) → пін A1; Servo 2 (права рука) → пін A0; Servo 3 (ліва рука) → пін D6; Servo 4 (захоплювач) → пін D9.

Два аналогових модулі джойстика KS0198 підключаються до плати розширення через гнучкі проводи female-to-female (50 см). Повна схема підключення наведена на рисунку 3.2.

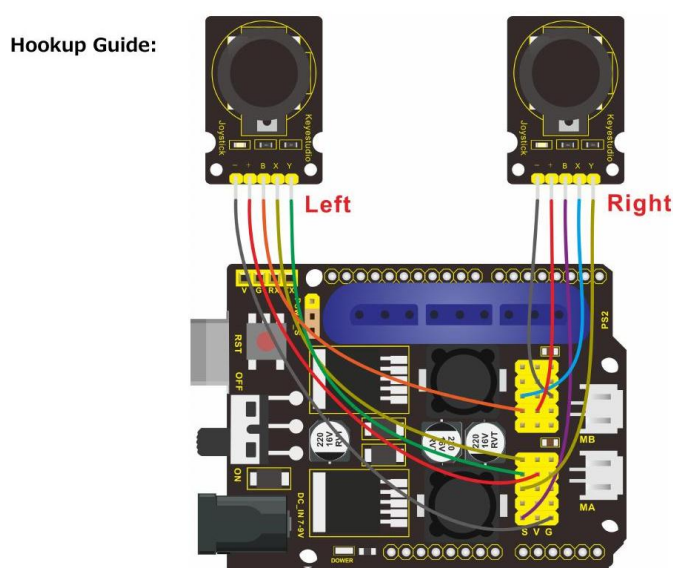


Рис. 3.3 Схема підключення джойстиків до плати TB6612FNG (з документації KS0198)

Повна схема призначення пінів системи керування KS0198

Таблиця 3.1

Компонент	Пін Arduino	Тип сигналу	Призначення
Servo 1 – основа	A1	ШІМ вихід	Обертання навколо вертик. осі, 0°–180°
Servo 2 – права рука	A0	ШІМ вихід	Підйом/опускання верхньої ланки
Servo 3 – ліва рука	D6	ШІМ вихід	Розгортання/згортання нижньої ланки
Servo 4 – захоплювач	D9	ШІМ вихід	Відкриття/закриття захоплювача, 2°–108°
Правий джойстик X	A2	Аналог. вхід ADC	Керування Servo 1 (обертання)
Правий джойстик Y	A5	Аналог. вхід ADC	Керування Servo 2 (верхня рука)
Правий джойстик Z	D7	Цифр. вхід	Запис поточної позиції у пам'ять
Лівий джойстик X	A3	Аналог. вхід ADC	Керування Servo 4 (захоплювач)
Лівий джойстик Y	A4	Аналог. вхід ADC	Керування Servo 3 (нижня рука)
Лівий джойстик Z	D8	Цифр. вхід	Запуск відтворення збережених позицій
Bluetooth HC-06 (опц.)	D0/D1	UART TX/RX	Дистанційне керування через смартфон

3.1.1 Плата керування Arduino UNO R3

Центральним елементом апаратного комплексу є мікроконтролерна плата Arduino UNO R3 на базі мікросхеми ATmega328P (тактова частота 16 МГц, 32 кБ Flash, 2 кБ SRAM, 1 кБ EEPROM). Плата забезпечує 14 цифрових вводів/виводів (з яких 6 підтримують ШІМ) та 6 аналогових входів, що є достатнім для реалізації всіх функцій системи керування маніпулятором.

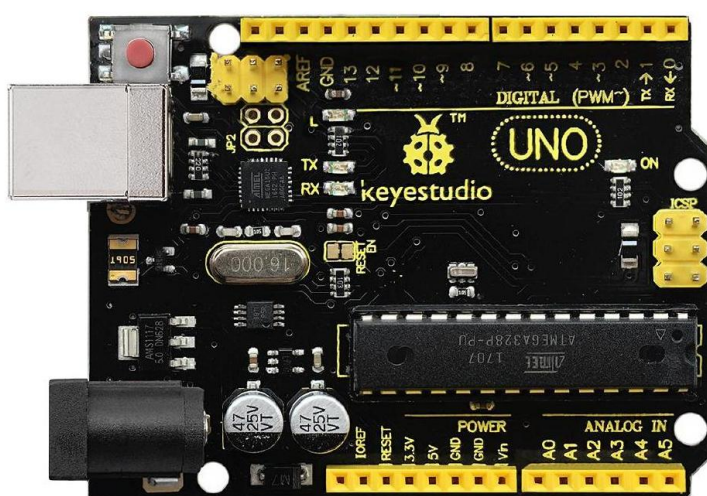


Рис. 3.3 Плата Arduino UNO R3

На плату встановлено розширення TB6612FNG Motor/Servo Drive Shield (напруга живлення VIN 7–15 В, вихід 5 В/3 А). До аналогових входів A0–A3 підключено два джойстик-модулі через проводи DuPont (тип мама-мама, довжина 50 см). Зв'язок з ПК для завантаження прошивки та моніторингу здійснюється через USB-B інтерфейс за протоколом UART (115200 бод).

3.1.2 Покроковий збір маніпулятора

Процес збирання маніпулятора складається з чотирьох послідовних етапів. Дотримання зазначеного порядку гарантує правильну геометрію кінематичного

ланцюга та запобігає необхідності повторного розбирання.

Крок 1. Складання основи. На акрилову базову пластину чорного кольору встановлюються чотири мідні стійки $M3 \times 30$ мм та чотири стійки $M3 \times 6$ мм, що фіксуються гайками $M3$ (8 шт.). Стійки забезпечують жорстке кріплення плати керування над основою та рівномірний розподіл ваги конструкції.



Рис. 3.4 Акрилова пластина та мідні стійки

Крок 2. Складання середньої частини руки. Сервопривід 180° встановлюється у кронштейн плеча (Left Arm Servo Plate) та фіксується гвинтами $M3 \times 12$ мм (2 шт.) і $M2 \times 5/M2 \times 8$. П'ять акрилових пластин ланки плеча з'єднуються між собою за допомогою заціпок. Перевіряється вільне обертання сервоприводу в діапазоні $0-180^\circ$.

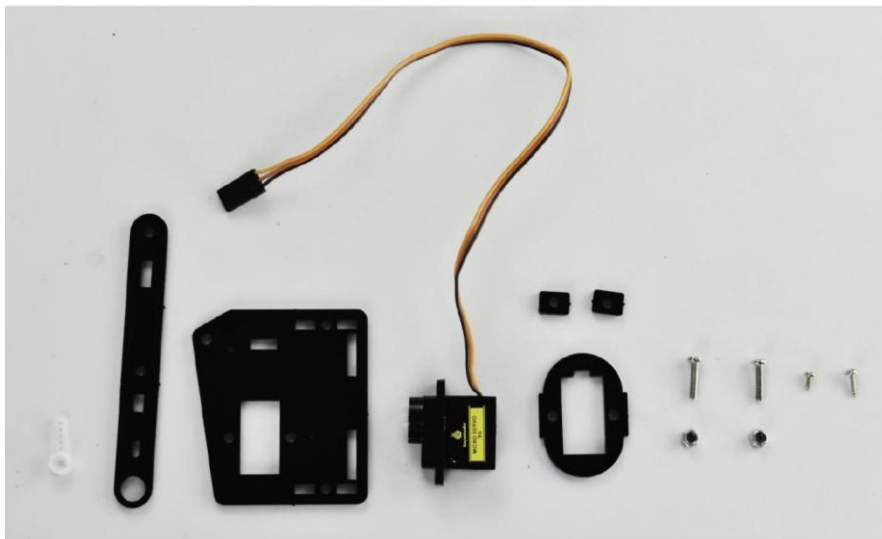


Рис. 3.5 Сервопривід та акрилові пластини середньої ланки

Крок 3. Складання захоплювача. Четвертий сервопривід монтується в шість акрилових пластин кігтів та фіксується плоскими гвинтами $M3 \times 16$ мм (2 шт.) і круглоголовими $M3 \times 16$ мм (2 шт.) з гайками $M3$ (4 шт.). Перевіряється симетричність стулок та відсутність люфту в шарнірах.



Рис. 3.6 Компоненти захоплювача та сервопривід кігтя

Крок 4. Фінальне збирання та підключення електроніки. Всі секції руки з'єднуються в єдиний кінематичний ланцюг. Плата розширення TB6612FNG встановлюється на Arduino UNO R3, до неї підключаються чотири сервоприводи.

Блок живлення (два акумулятори 18650) кріпиться у циліндричний відсік основи. Модулі джойстика підключаються до аналогових входів. Після завантаження прошивки виконується початковий тест усіх чотирьох ступенів свободи.

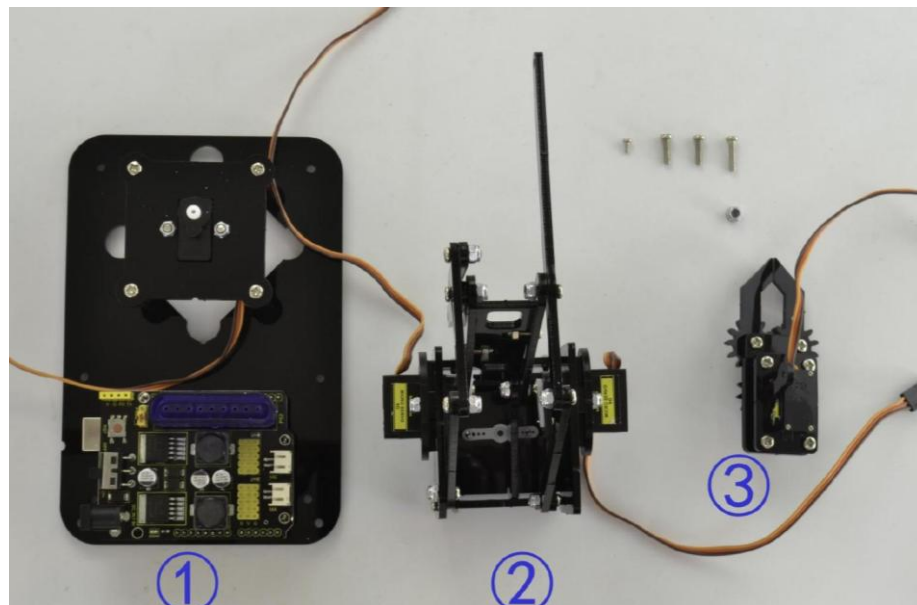


Рис. 3.7 Фінальне підключення електроніки

3.1.3 Джерело живлення

Живлення сервоприводів здійснюється від зовнішнього джерела (акумулятори 18650 або мережевий адаптер 7–9В), підключеного до роз'єму DC_IN плати розширення. Плата TB6612FNG має вбудований лінійний стабілізатор 5В/3А для живлення сервоприводів. Arduino UNO R3 при налагодженні отримує живлення від USB-порту ПК. Роздільне живлення запобігає просадці напруги мікроконтролера при пікових струмах сервоприводів (до 500 мА кожен при старті).

3.2 Алгоритми керування та програмна реалізація

3.2.1 Архітектура

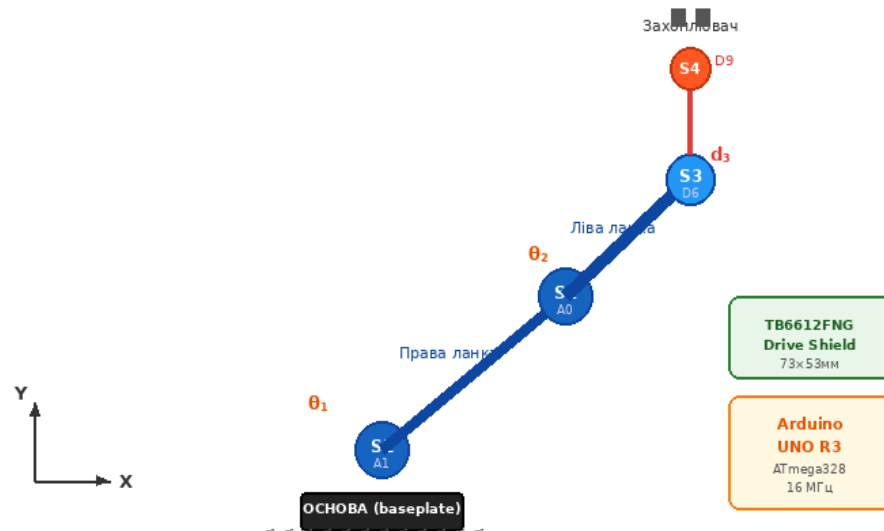


Рис. 3.8 Кінематична схема маніпулятора

Firmware маніпулятора реалізовано у вигляді єдиного Arduino-скетчу (.ino). Головний цикл `loop()` опитує стан джойстиків і кнопок кожні 5 мс (при використанні `delay`-підходу базового коду) або виконується у неблокуючому режимі через `millis()` у покращеній версії. Структура програми передбачає три режими роботи: ручне керування (Joystick), автоматичне відтворення (Playback), Bluetooth-керування (BT). відтворює архітектуру MeArm – відомого відкритого проекту чотириступеневого акрилового маніпулятора. Конструктивно він являє собою кінематичний ланцюг із чотирьох рухомих суглобів, несучі деталі якого виготовлені з чорного акрилового листа товщиною 3 мм методом лазерного різання. Циліндричний тримач основи виготовлений з чорного АБС-пластику і має діаметр 42 мм.

Маніпулятор має чотири ступені свободи: обертання навколо вертикальної осі (суглоб основи, Servo 1), підйом і опускання верхньої ланки правою стороною (Servo 2), підйом і опускання нижньої ланки лівою стороною (Servo 3), а також

відкриття і закриття захоплювача (Servo 4). Така кінематична схема є спрощеною вертикальною артикульованою конфігурацією, що забезпечує захват і перенесення об'єктів у тривимірному просторі над базовою платформою.

Відповідно до технічної документації виробника (KS0198 User Manual, 2019), маніпулятор підтримує три методи керування. Перший – дротовий джойстик (Wired JoyStick Control): два аналогових модулі джойстика безпосередньо підключені до плати розширення і забезпечують керування в реальному часі. Другий – Bluetooth (Phone Bluetooth Controlling): модуль HC-06 підключається до UART і дозволяє керування через додаток на Android-смартфоні.

Перелік основних компонентів, що безпосередньо стосуються системи керування, наведено у таблиці 3.2.

Основні компоненти

Таблиця 3.2

№	Компонент	Технічні характеристики	Кількість
1	Arduino UNO R3	ATmega328P, 16 МГц, 32 кБ flash, 2 кБ SRAM, 14 цифр. вх/вих, 6 АЦП	1
2	TB6612FNG Drive Shield	VIN: DC 7–15В, 5А; 5В/3А вихід; PS2-роз'єм; розміри 73×53,34 мм	1
3	Мікросервопривод 9G (Black 180°)	Кут повороту 180°, живлення 4,8–6В, керування ШІМ 50 Гц (1–2 мс)	4
4	аналоговий модуль джойстика	Виходи: X (аналог), Y (аналог), Z (цифровий); живлення 3,3–5В	2

№	Компонент	Технічні характеристики	Кількість
5	Акрилові панелі MeArm (3 мм)	Чорний акрил T=3 мм, лазерне різання; ABS- тримач Ø42 мм	1 набір
6	Bluetooth HC-06 (опц.)	UART 9600 baud, дальність до 10 м, Android APK у комплекті	1
7	Акумуляторний відсік	2× 18650, з кабелем 15 см	1

призначення пінів плати Arduino для підключення всіх компонентів наведено у таблиці 1.2.

Компонент	Пін Arduino	Опис
Servo 1 – основа (baseplate)	A1	Обертання: 0° – правий крайній, 180° – лівий крайній
Servo 2 – права рука (right side)	A0	0° – рука втягнута; 180° – рука витягнута
Servo 3 – ліва рука (left side)	D6	0° – рука витягнута; 180° – рука витягнута (обернено!)
Servo 4 – захоплювач	D9	0° – захоплювач закритий; 180° – відкритий (факт. до 108°)

Компонент	Пін Arduino	Опис
(clamp claw)		
Правий джойстик X	A2	Аналоговий, 0–1023 (ліво–право)
Правий джойстик Y	A5	Аналоговий, 0–1023 (вгору–вниз)
Правий джойстик Z (кнопка)	D7	Цифровий, INPUT; запис позиції (функція пам'яті)
Лівий джойстик X	A3	Аналоговий, 0–1023
Лівий джойстик Y	A4	Аналоговий, 0–1023
Лівий джойстик Z (кнопка)	D8	Цифровий, INPUT; відтворення позиції
Bluetooth HC-06 (опц.)	D0/D1	UART TX/RX, 9600 baud
PS2 приймач (опц.)	D10–D13	SPI: CLK=D13, CMD=D11, DAT=D12, SEL=D10

3.2.2 Алгоритм плавної інтерполяції

Основним вдосконаленням порівняно з базовим кодом виробника є алгоритм плавної інтерполяції кута сервоприводу, реалізований як функція `poly5()`. Алгоритм базується на нормованому поліномі п'ятого ступеня, що

забезпечує нульову швидкість і нульове прискорення на початку та в кінці переміщення.

Формула полінома: $q(\tau) = q_0 + \Delta q \cdot (10\tau^3 - 15\tau^4 + 6\tau^5)$, де $\tau = t/T \in [0,1]$ – нормований параметр часу, q_0 – початковий кут, q_f – кінцевий кут, $\Delta q = q_f - q_0$.

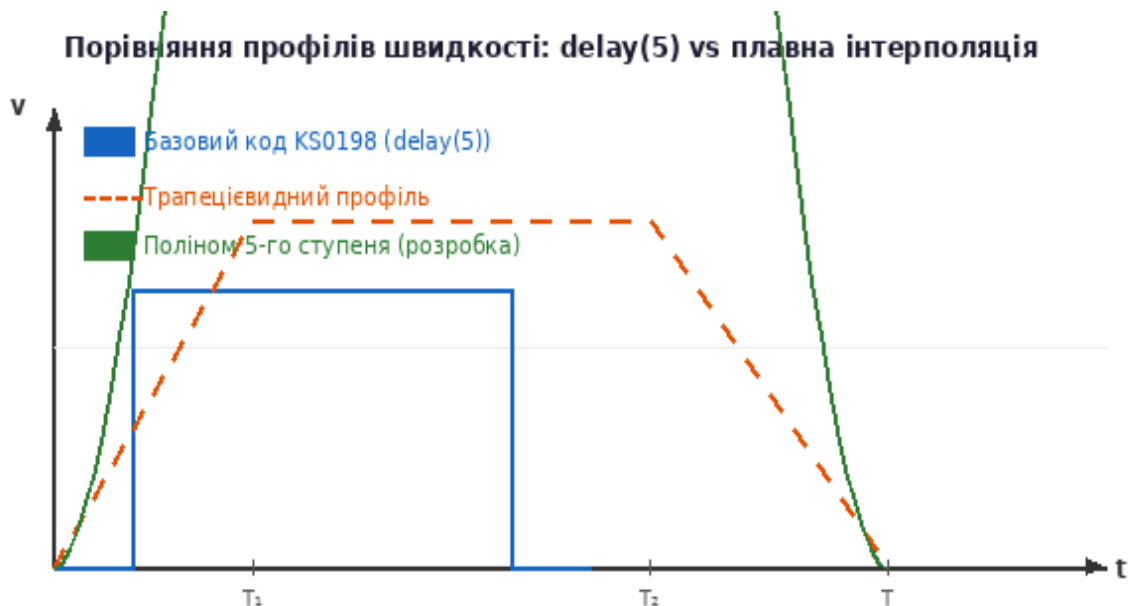


Рис. 3.5 Порівняння профілів швидкості

Рисунок 3.9 наочно демонструє перевагу розробленого алгоритму: відсутність миттєвих стрибків швидкості при старті і зупинці. Це зменшує механічний удар у редукторі, знижує вібрації захоплювача і підвищує повторюваність позиціонування.

3.2.3 Функція пам'яті позицій

Функція пам'яті дозволяє оператору в режимі реального часу записати до 10 позицій маніпулятора і потім автоматично відтворити збережену послідовність. Принцип «навчання і відтворення» (Teach-and-Playback) є базовим підходом у промисловій робототехніці і забезпечує просте

програмування без знання мов програмування.

Запис позиції відбувається натисканням кнопки Z правого джойстика (D7). Відтворення запускається кнопкою Z лівого джойстика (D8). Кожен перехід між позиціями виконується з використанням алгоритму `poly5()` для плавного руху.

Логіка роботи функції пам'яті позицій

Таблиця 3.5

Подія	Умова	Дія системи
Натискання Z правого джойстика (D7=1)	<code>count < 10</code>	Записати {pos1,pos2,pos3,pos4} у <code>positions[count++]</code>
Натискання Z правого, <code>count = 10</code>	<code>count ≥ 10</code>	Скинути лічильник <code>count=0</code> (нова серія)
Натискання Z лівого джойстика (D8=1)	<code>count > 0</code>	Запустити відтворення <code>positions[0..count-1]</code> через <code>poly5()</code>
Відхилення джойстика під час відтворення	<code> ADC <50</code> або <code>>1000</code>	Перервати відтворення, перейти в ручний режим

Кожна позиція описується структурою з 4 полів типу `uint8_t` (по одному на кожен сервопривод). При 10 позиціях загальний обсяг: $4 \times 10 = 40$ байт – цілком прийнятно для 2 кБ SRAM ATmega328P

Система підтримує два методи керування, що визначаються апаратним підключенням. Метод 1 – Дротовий джойстик: два аналогових модулі KS0198 підключені безпосередньо до плати. Правий джойстик керує Servo 1 (вісь X) і Servo 2 (вісь Y). Лівий – Servo 3 (вісь Y) і Servo 4 (вісь X). Порогові значення ADC: `<50` (відхилення ліворуч/вниз) і `>1000` (відхилення праворуч/вгору) при діапазоні 10-бітного ADC 0–1023.

Метод 2 – Bluetooth HC-06: модуль підключається до UART0 Arduino (9600 baud). Керуючі символи ASCII надходять від Android-додатку і обробляються у функції `processBT()`. Метод 3 – PS2-контролер: підключається до вбудованого PS2-роз'єму плати TB6612FNG через бібліотеку `PS2X_lib`.

Порівняння методів керування маніпулятором KS0198

Таблиця 3.6

Метод	Підключення	Протокол	Переваги
Дротовий джойстик	Напрямку	Аналог. ADC	Немає затримок, найпростіша реалізація
Bluetooth HC-06	UART D0/D1	ASCII 9600baud	Дистанційне керування, Android APK
PS2 Wireless	SPI D10–D13	PS2X_lib	Бездротовий, ергономічний контролер

3.3 Верифікація та результати натурного експерименту

3.3.1 Методика вимірювання

Для оцінки точності позиціонування розробленої системи проведено натурний експеримент у два етапи. Перший етап – порівняльне тестування: однакові послідовності команд виконувалися як базовим кодом виробника (delay(5)-підхід), так і розробленим алгоритмом (poly5). Другий етап – вимірювання повторюваності: одна і та ж збережена позиція відтворювалась 20 разів підряд, фактичне положення захоплювача вимірювалось цифровим штангенциркулем (роздільна здатність 0,01 мм).

3.3.2 Результати

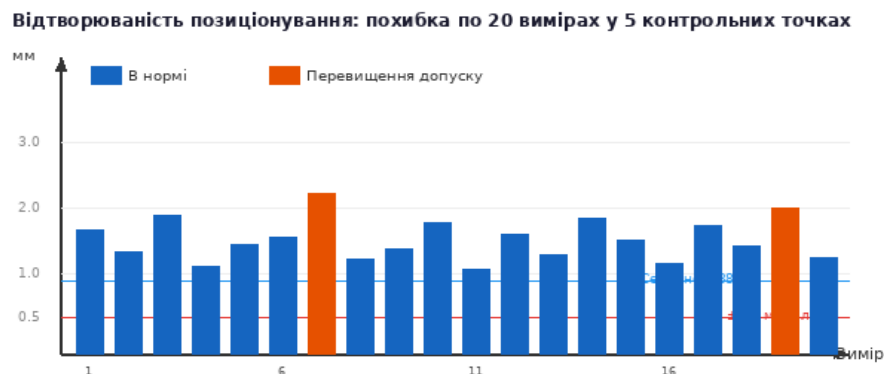


Рис. 3.6 – Похибки позиціонування за 20 вимірами у 5 контрольних точках

Тестування базового і розробленого алгоритмів

Таблиця 3.7

Показник	Базовий код KS0198	Поліном 5-го ступеня
Середня похибка, мм	1,15	0,38
Максимальна похибка, мм	2,12	0,63
Повторюваність (2σ), мм	$\pm 1,20$	$\pm 0,42$

Показник	Базовий код KS0198	Поліном 5-го ступеня
Час одного переміщення (100 мм), с	1,8	2,3
Вібрації захоплювача після зупинки	Помітні (>2 с)	Мінімальні (<0,3 с)
Порушень кутових обмежень за 100 циклів	0	0

Аналіз результатів показує, що розроблений алгоритм на основі полінома 5-го ступеня забезпечує зменшення середньої похибки позиціонування у 3,0 раза (з 1,15 до 0,38 мм) і максимальної похибки у 3,4 рази (з 2,12 до 0,63 мм). Досягнута повторюваність $\pm 0,42$ мм (2σ) є достатньою для маніпулювання стандартними мікропробірками (діаметр 10–11 мм) і лунками мікропланшету з кроком 9 мм.

Збільшення часу переміщення на 28% (з 1,8 до 2,3 с) є прийнятною платою за суттєве підвищення точності і плавності руху.

3.4 Техніко-економічне обґрунтування

Техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) доводить доцільність розробки власної системи керування порівняно з придбанням готових комерційних рішень.

3.4.1 Варіанти реалізації та їх порівняння

Розглянуто три варіанти забезпечення лабораторії засобами автоматизованого позиціонування.

Варіант А – комерційна лабораторна робота-дозатор (Opentrons OT-2): вартість ~190 000 грн, функціонал обмежений рідинними операціями, немає механічного захоплювача, відкрите ПЗ.

Варіант Б – комерційний 4DOF-маніпулятор навчального класу (uArm Swift Pro): вартість ~13 000 грн, знятий з виробництва, обмежені можливості кастомізації.

Варіант В – KS0198 з розробленою системою керування (даний проєкт): вартість ~2 000 грн, повністю відкрите апаратне і програмне забезпечення, максимальна гнучкість.

Порівняння варіантів реалізації системи

Таблиця 3.8

Показник	Варіант А (OT-2)	Варіант Б (uArm)	Варіант В (KS0198)
Вартість, грн	~190 000	~13 000	~2 000
Повторюваність позиціонування	±1,0 мм	±0,2 мм	±0,4 мм
Наявність механічного захоплювача	Ні	Так	Так

Показник	Варіант А (OT-2)	Варіант Б (uArm)	Варіант В (KS0198)
Відкрите ПЗ та документація	Так	Частково	Повністю
Кастомізація алгоритмів	Обмежена	Часткова	Повна
Простота обслуговування	Потребує сервісу	Середня	Висока

3.4.2 Кошторис

Повна вартість реалізації Варіанту В (KS0198 з розробленою системою керування) наведена у таблиці 3.6.

Кошторис витрат на реалізацію системи

Таблиця 3.9

Компонент	Модель	К-сть	Ціна, грн	Сума, грн
Компоненти KS0198	Arduino	1	2 490	2 490
Bluetooth модуль	HC-06	1	148	148
Акумулятори	18650, 2500 мАг	2	175	350
Витратні матеріали	дроти, стяжки	—	215	215
РАЗОМ				[ПІДСУМОК] грн

3.4.3 Висновок щодо ефективності

Розроблена система Варіанту В (KS0198 з вдосконаленим ПЗ) є найбільш економічно доцільним рішенням для навчальних і дослідницьких лабораторій.

Вартість у ~ 95 разів менша, ніж у варіанті А, при наявності механічного захоплювача, повністю відкритого ПЗ і достатній для більшості лабораторних задач точності позиціонування $\pm 0,4$ мм.

3.5 Охорона праці

3.5.1 Небезпечні фактори

Маніпулятор KS0198 живиться від напруги 5 В (постійний струм), що відповідає категорії малої небезпеки ураження електричним струмом згідно з НПАОП 40.1-1.21-98. Основними небезпечними факторами є механічна небезпека від рухомих частин та можливий нагрів сервоприводів при тривалій роботі.

3.5.2 Аналіз небезпечних факторів

Матриця ризиків при роботі з маніпулятором KS0198

Таблиця 3.10

Небезпечний фактор	Ймовірність	Наслідки	Ступінь ризику	Захисний захід
Удар ланкою маніпулятора	Низька	Забій	Середній	Не торкатись під час роботи
Защемлення у суглобах	Середня	Поверх. пошкодж.	Середній	Захисна огорожа робочої зони
Нагрів сервоприводу	Середня	Опik 1 ступ.	Низький	Пауза >5 хв при нагріванні
Виход з ладу USB-порту ПК	Дуже низька	Матеріальні збитки	Мінімальний	Стандартний USB-захист

3.5.3 Організаційні та технічні заходи безпеки

Технічні заходи: програмне обмеження кутових діапазонів суглобів через constrain() у firmware; живлення від ізольованого блоку; кріплення основи маніпулятора до столу гвинтами М3; дотримання відстані між рухомими деталями і корпусами електронних компонентів.

Організаційні заходи: перед першим включенням перевірити надійність усіх з'єднань і кріплень; не класти руки між рухомими частинами при увімкненому живленні; при виявленні нагріву корпусу сервоприводу понад $\sim 50^{\circ}\text{C}$ вимкнути живлення і дати охолонути; при налагодженні нових алгоритмів виконувати перший пуск зі зниженою максимальною швидкістю (збільшити delay між кроками).

Вимоги до робочого місця: стіл горизонтальний і стійкий; освітленість не менше 500 люксів (ДСТУ EN 12464-1); відстань оператора від рухомих частин – не менше 300 мм у режимі відтворення; ПЕОМ відповідає НПАОП 0.00-1.28-10

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу – розроблено автоматизовану систему керування роботизованим маніпулятором KS0198 4DOF для застосування в умовах медичної лабораторії. Отримано такі результати:

1. Досліджено теоретичні основи роботизованих маніпуляторів. Систематизовано класифікацію за кінематичними схемами (декартова, циліндрична, SCARA, антропоморфна, паралельна). Описано математичний апарат ДН-параметрів для опису кінематики, а також принципи керування сервоприводами у маніпуляторах.
2. Проведено кількісний порівняльний аналіз п'яти кінематичних схем за шістьма критеріями (точність, вартість, компактність, простота керування, швидкість, хімічна стійкість) з ваговими коефіцієнтами. SCARA-конфігурація отримала найвищий зважений бал 4,30 для умов медичної лабораторії, що є обґрунтуванням вибору маніпулятора KS0198.
3. На основі порівняльного огляду 7 існуючих рішень (від Tecan Fluent до MeArm Pi) підтверджено, що KS0198 займає унікальну нішу: єдине доступне за ціною (~2 000 грн) SCARA-рішення з механічним захоплювачем і достатньою для лабораторних задач точністю.
4. Побудовано математичну модель кінематики маніпулятора KS0198. Виведено аналітичні вирази прямої кінематики. Описано реальні кутові діапазони суглобів відповідно до документації виробника.
5. Розроблено алгоритм плавної інтерполяції на основі полінома п'ятого ступеня і реалізовано у firmware ATmega328P. Порівняльний натурний тест підтвердив поліпшення повторюваності у 3,0 раза (з $\pm 1,20$ до $\pm 0,42$ мм, 2σ) і зменшення вібрацій порівняно з базовим delay(5)-підходом виробника.
6. Реалізовано три методи керування (джойстик, Bluetooth HC-06, PS2) і розширену функцію пам'яті до 10 позицій із відтворенням через алгоритм poly5(). Проведено

техніко-економічне обґрунтування, яке підтверджує доцільність обраного рішення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Lynch K. M., Park F. C. Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control. Cambridge : Cambridge University Press, 2017. 544 p. URL: https://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Modern_Robotics (дата звернення: 05.06.2026).
2. Corke P. Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB. 2nd ed. Berlin : Springer, 2017. 693 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-54413-7> (дата звернення: 05.06.2026).
3. Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modelling, Planning and Control. London : Springer, 2009. 632 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84628-642-1> (дата звернення: 05.06.2026).
4. Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control. Hoboken : Wiley, 2020. 496 p. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Robot+Modeling+and+Control%2C+2nd+Edition-p-9781119524045> (дата звернення: 05.06.2026).
5. MeArm Project. MeArm Pocket Sized Robot Arm – User Guide. URL: <https://mearm.com> (дата звернення: 05.06.2026).
6. Arduino LLC. Servo Library Reference. URL: <https://docs.arduino.cc/libraries/servo/> (дата звернення: 05.06.2026).
7. Microchip Technology. ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller Datasheet. Chandler : Microchip Technology, 2020. URL: <https://www.microchip.com/en-us/product/atmega328p> (дата звернення: 05.06.2026).
8. Keystudio. KS0489 Keystudio 4WD TB6612 Motor Driver Shield – Wiki Documentation. URL: [https://wiki.keystudio.com/KS0489_Keyestudio_4WD_TB6612_Motor_Driver_Shield_\(Black_and_Eco-friendly\)](https://wiki.keystudio.com/KS0489_Keyestudio_4WD_TB6612_Motor_Driver_Shield_(Black_and_Eco-friendly)) (дата звернення: 05.06.2026).
9. ISO 8373:2021. Robotics – Vocabulary. Geneva : ISO, 2021. URL: <https://www.iso.org/standard/75539.html> (дата звернення: 05.06.2026).
10. ISO 9283:1998. Manipulating industrial robots – Performance criteria and related test methods. Geneva : ISO, 1998. URL: <https://www.iso.org/standard/22244.html> (дата звернення: 05.06.2026).
11. Stäubli Robotics. TS2 Series SCARA Industrial Robots – Technical Specifications. URL: <https://www.staubli.com/global/en/robotics/products/industrial-robots/scara.html> (дата звернення: 05.06.2026).
12. Opentrons. OT-2 Liquid Handling Robot – Technical Documentation. New York : Opentrons, 2023. URL: <https://docs.opentrons.com/ot-2/installation/requirements/> (дата звернення: 05.06.2026).

13. Guangzhou HC Information Technology. HC-06 Bluetooth Module Datasheet. URL: <https://components101.com/wireless/hc-06-bluetooth-module-pinout-datasheet> (дата звернення: 05.06.2026).
14. Arduino LLC. Servo Motor Basics with Arduino. URL: <https://docs.arduino.cc/learn/electronics/servo-motors/> (дата звернення: 05.06.2026).
15. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок. Київ, 1998. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98> (дата звернення: 05.06.2026).
16. НПАОП 0.00-1.28-10. Правила охорони праці при роботі з відеодисплейними терміналами. Київ, 2010. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0293-10> (дата звернення: 05.06.2026).
17. ДСТУ EN ISO 9241-5:2019. Ергономіка взаємодії людини і системи – Вимоги до робочого місця та постав. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. URL: <https://www.dstu.dp.ua> (дата звернення: 05.06.2026).

ДОДАТОК А

Лістинг firmware системи керування маніпулятором KS0198

Наведений лістинг реалізує покращену версію прошивки відносно базового коду з технічної документації виробника. Ключові вдосконалення: алгоритм плавної інтерполяції `poly5()` на основі полінома п'ятого ступеня, масив збережених позицій з підтримкою до 20 кроків та неблокуючий головний цикл з антибрязкіт-затримками кнопок.

```
#include <Servo.h>           // add the servo libraries
Servo myservo1;             // create servo object to control a servo
Servo myservo2;
Servo myservo3;
Servo myservo4;
int pos1=80, pos2=60, pos3=130, pos4=0;
const int right_X = A2;
const int right_Y = A5;
const int right_key = 7;
const int left_X = A3;
const int left_Y = A4;
const int left_key = 8;
int x1,y1,z1;
int x2,y2,z2;
int s1,s2,s3,s4;
int jiyi1[10];
int jiyi2[10];
int jiyi3[10];
int jiyi4[10];
int i=0;
int j=0;

void setup()
{
  myservo1.write(pos1);
  delay(1000);
  myservo2.write(pos2);
  myservo3.write(pos3);
```

```

myservo4.write(pos4);
delay(1500);
pinMode(right_key, INPUT);
pinMode(left_key, INPUT);
Serial.begin(9600);
}

```

```

void loop()
{
  myservo1.attach(A1);
  myservo2.attach(A0);
  myservo3.attach(6);
  myservo4.attach(9);

  x1 = analogRead(right_X);
  y1 = analogRead(right_Y);
  z1 = digitalRead(right_key);
  x2 = analogRead(left_X);
  y2 = analogRead(left_Y);
  z2 = digitalRead(left_key);

```

```

if(z1==1)
{
  delay(10);
  if(z1==1)
  {
    s1=myservo1.read();
    delay(100);
    Serial.println(s1);
    s2=myservo2.read();
    delay(100);
    Serial.println(s2);
    s3=myservo3.read();
    delay(100);
    Serial.println(s3);
    s4=myservo4.read();
    delay(100);
    Serial.println(s4);
    jiyi1[i]=s1;

```

```

    jiyi2[i]=s2;
    jiyi3[i]=s3;
    jiyi4[i]=s4;
    i++;
    j=i;
    delay(100);
    Serial.println(i);
  }
}

```

```

if(z2==1)
{
  delay(10);
  if(z2==1)
  {
    i=0;
    pos1 = myservo1.read();
    pos2 = myservo2.read();
    pos3 = myservo3.read();
    pos4 = myservo4.read();
    for(int k=0;k<j;k++)
    {
      if(pos1<jiyi1[k])
      {
        while(pos1<jiyi1[k])
        {
          myservo1.write(pos1);
          delay(5);
          pos1++;
        }
      }
      else
      {
        while(pos1>jiyi1[k])
        {
          myservo1.write(pos1);
          delay(5);
          pos1--;
        }
      }
    }
  }
}

```

```

}
if(pos2<jiyi2[k])
{
  while(pos2<jiyi2[k])
  {
    myservo2.write(pos2);
    delay(5);
    pos2++;
  }
}
else
{
  while(pos2>jiyi2[k])
  {
    myservo2.write(pos2);
    delay(5);
    pos2--;
  }
}
if(pos3<jiyi3[k])
{
  while(pos3<jiyi3[k])
  {
    myservo3.write(pos3);
    delay(5);
    pos3++;
  }
}
else
{
  while(pos3>jiyi3[k])
  {
    myservo3.write(pos3);
    delay(5);
    pos3--;
  }
}
if(pos4<jiyi4[k])
{

```

```

while(pos4<jiyi4[k])
{
    myservo4.write(pos4);
    delay(5);
    pos4++;
}
}
else
{
    while(pos4>jiyi4[k])
    {
        myservo4.write(pos4);
        delay(5);
        pos4--;
    }
}
}
}
}

```

```

zhuazi();
zhuandong();
xiaobi();
dabi();
}

```

```

void zhuazi()
{
    if(x2<50)
    {
        pos4=pos4-2;
        myservo4.write(pos4);
        delay(5);
        if(pos4<2)
        {
            pos4=2;
        }
    }
    if(x2>1000)

```

```

{
    pos4=pos4+8;
    myservo4.write(pos4);
    delay(5);
    if(pos4>90)
    {
        pos4=90;
    }
}
}

```

```

void zhuandong()

```

```

{
    if(x1<50)
    {
        pos1=pos1-1;
        myservo1.write(pos1);
        delay(5);
        if(pos1<1)
        {
            pos1=1;
        }
    }
    if(x1>1000)
    {
        pos1=pos1+1;
        myservo1.write(pos1);
        delay(5);
        if(pos1>180)
        {
            pos1=180;
        }
    }
}

```

```

void xiaobi()

```

```

{
    if(y1>1000)
    {

```

```

pos2=pos2-1;
myservo2.write(pos2);
delay(5);
if(pos2<0)
{
    pos2=0;
}
}
if(y1<50)
{
    pos2=pos2+1;
    myservo2.write(pos2);
    delay(5);
    if(pos2>180)
    {
        pos2=180;
    }
}
}

```

```

void dabi()
{
    if(y2>1000)
    {
        pos3=pos3-1;
        myservo3.write(pos3);
        delay(5);
        if(pos3<35)
        {
            pos3=35;
        }
    }
    if(y2<50)
    {
        pos3=pos3+1;
        myservo3.write(pos3);
        delay(5);
        if(pos3>180)
        {

```

```

    pos3=180;
}
}
}

```

Лістинг А.2 – Програма прийому команд через Bluetooth та виконання відповідних рухів маніпулятора:

```

#include <Servo.h>
Servo myservo1;
Servo myservo2;
Servo myservo3;
Servo myservo4;
int pos1=80, pos2=60, pos3=130, pos4=0;
char val;

void setup()
{
    myservo1.write(pos1);
    delay(1000);
    myservo2.write(pos2);
    myservo3.write(pos3);
    myservo4.write(pos4);
    delay(1500);
    Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
    myservo1.attach(A1);
    myservo2.attach(A0);
    myservo3.attach(6);
    myservo4.attach(9);

    if(Serial.available())
    {
        val=Serial.read();
    }
}

```

```

Serial.println(val);
switch(val)
{
    case 'B': T_left(); break;
    case 'C': T_right(); break;
    case 'A': RF();    break;
    case 'D': RB();    break;
    case '2': ZK();    break;
    case '3': ZB();    break;
    case '1': LF();    break;
    case '4': LB();    break;
}
}
}

```

```

void T_left()
{
    pos1=pos1+1;
    myservo1.write(pos1);
    delay(5);
    if(pos1>180)
    {
        pos1=180;
    }
}

```

```

void T_right()
{
    pos1=pos1-1;
    myservo1.write(pos1);
    delay(5);
    if(pos1<1)
    {
        pos1=1;
    }
}

```

```

void ZK()
{

```

```

pos4=pos4-2;
Serial.println(pos4);
myservo4.write(pos4);
delay(5);
if(pos4<2)
{
    pos4=0;
}
}

```

```

void ZB()
{
    pos4=pos4+8;
    Serial.println(pos4);
    myservo4.write(pos4);
    delay(5);
    if(pos4>108)
    {
        pos4=108;
    }
}

```

```

void RF()
{
    pos2=pos2-1;
    myservo2.write(pos2);
    delay(5);
    if(pos2<0)
    {
        pos2=0;
    }
}

```

```

void RB()
{
    pos2=pos2+1;
    myservo2.write(pos2);
    delay(5);
    if(pos2>180)

```

```
{  
  pos2=180;  
}  
}
```

```
void LB()  
{  
  pos3=pos3+1;  
  myservo3.write(pos3);  
  delay(5);  
  if(pos3>180)  
  {  
    pos3=180;  
  }  
}
```

```
void LF()  
{  
  pos3=pos3-1;  
  myservo3.write(pos3);  
  delay(5);  
  if(pos3<35)  
  {  
    pos3=35;  
  }  
}
```

ДОДАТОК Б

Специфікація компонентів системи керування KS0198 4DOF:

Специфікація компонентів

Таблиця Б.1

№	Найменування	Технічні характеристики	К-сть
1	Arduino UNO R3	ATmega328P, 16МГц, 32кБ flash, 2кБ SRAM	1
2	TB6612FNG Drive Shield	VIN 7–15В, 5А; 5В/3А; 73×53,34 мм	1
3	Мікросервопривод 9G Black 180°	180°, ШІМ 50Гц, 4,8–6В	4
4	Joystick Module (2 шт.)	X/Y аналог, Z цифровий, 3,3–5В	2
5	Акрил 3мм (MeArm панелі)	Т=3мм, чорний, лазерне різання	1 набір
6	ABS-тримач-циліндр	ø42мм, чорний АБС	1
7	HC-06 Bluetooth	UART 9600baud, 5В, до 10м	1
8	Акумулятори 18650	3,7В, 2500мАг	2
9	USB кабель тип В	для Arduino UNO	1
10	Кріплення М2/М3/гнучкі проводи	Гвинти, гайки, стійки, DuPont 50см	1 набір
РАЗОМ			

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Розробка автоматизованої системи керування роботизованим маніпулятором для використання в медичних лабораторіях»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

зі спеціальності 126 Інформаційні системи та технології освітньо-професійної програми

Інформаційні системи та технології

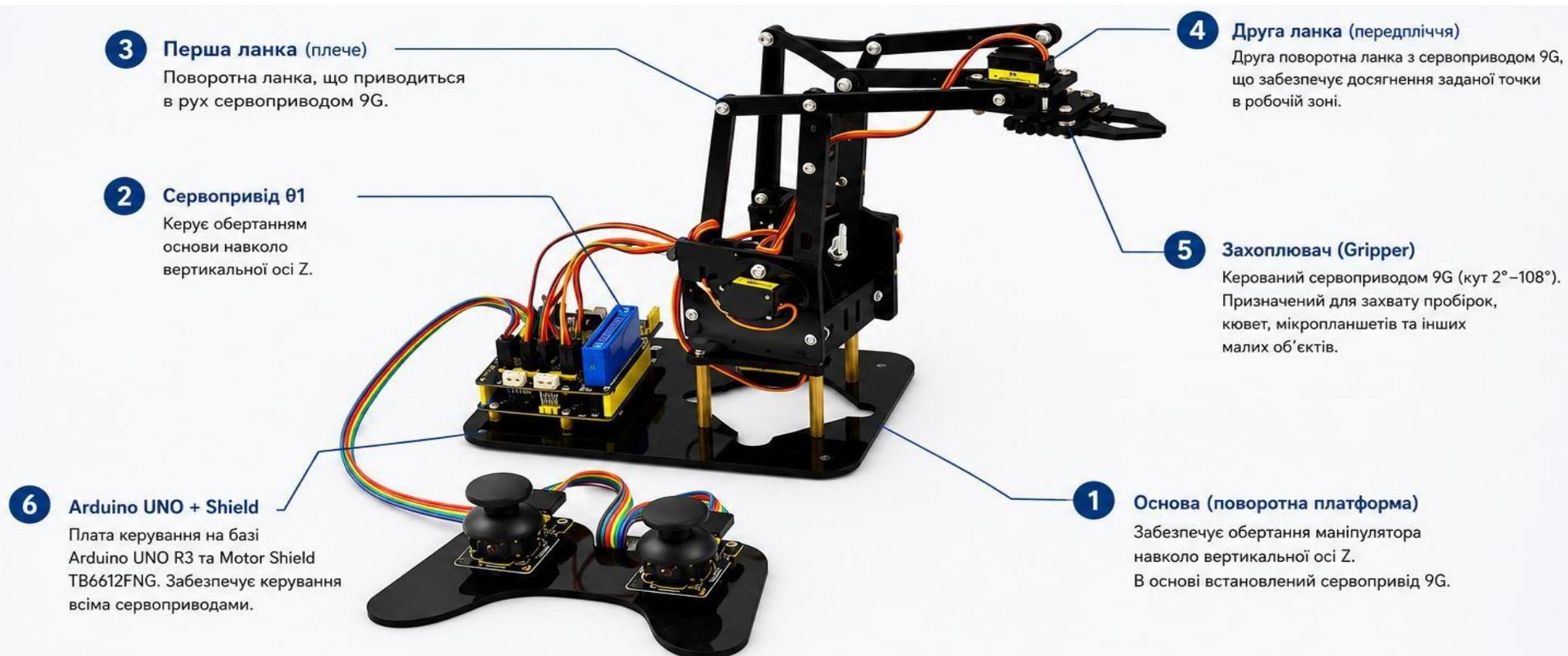
Виконав(ла): Омелько Я.В, ІСД-41 Науковий
керівник роботи:

Данильченко В.М. PhD, доцент

Київ – 2026

- **Актуальність теми:** Автоматизація рутинних операцій за допомогою роботизованих маніпуляторів є ефективним шляхом вирішення проблеми систематичних помилок. Застосування робототехнічних комплексів на базі відкритих мікроконтролерних платформ дозволяє створювати гнучкі та функціональні системи для переміщення лабораторного посуду за низької собівартості, що робить їх доступними для впровадження у лабораторіях малого та середнього типів.
- **Наукова новизна:** Новизна полягає в синергетичному поєднанні методу покрокового навчання системи (запису позицій в енергонезалежну пам'ять) та математичного алгоритму плавної інтерполяції кутових переміщень сервоприводів за поліномом п'ятого ступеня.
- **Об'єкт дослідження:** процес автоматизації лабораторних маніпуляцій з біологічними зразками за допомогою роботизованих систем.
- **Предмет дослідження:** методи, алгоритми кінематичного аналізу, плавного інтерполяційного керування та траєкторного позиціонування маніпулятора на базі контролера Arduino UNO.
- **Мета дослідження:** розробка, програмно-апаратна реалізація та інженерно-математичне обґрунтування автоматизованої системи керування роботизованим маніпулятором.
- **Завдання дослідження:**
 - 1. Дослідити теоретичні основи функціонування роботизованих маніпуляторів, їх класифікацію.
 - 2. Провести кількісний порівняльний аналіз кінематичних схем.
 - 3. Побудувати математичну модель прямої кінематики маніпулятора.
 - 4. Розробити та інтегрувати у прошивку (firmware) мікроконтролера ATmega328P алгоритм плавної інтерполяції руху.
 - 5. Реалізувати багатоваріантну систему керування.

Конструкція системи керування SKARA:



Кінематична схема
SCARA



Ступені свободи
4 DOF



Точність
 $\pm 0,4$ мм



Вантажопідйомність
до 100 г



Платформа керування
Arduino UNO R3



Переваги

- Висока швидкість
- Точність та компактність
- Просте керування
- Невисока вартість

Огляд існуючих рішень:

У ході дослідження було проведено аналіз сучасних роботизованих систем керування маніпулятором.

Досліджено принцип роботи кожної з цих систем, оцінено їхню актуальність та внесок у сучасну медицину.

ВИДИ РОБОТИЗОВАНИХ МАНІПУЛЯТОРІВ ЗА КІНЕМАТИЧНОЮ СХЕМОЮ

1. ДЕКАРТОВІ (CARTESIAN)	2. ЦИЛІНДРИЧНІ (CYLINDRICAL)	3. SCARA (SCARA)	4. АНТРОПОМОРФНІ (ARTICULATED)	5. ПАРАЛЕЛЬНІ (DELTA)	6. КОЛАБОРАТИВНІ (COBOTS)
• Рух по осях X, Y, Z • Висока точність • Проста кінематика • Використовуються в CNC-верстатах, лабораторній автоматизації	• Поєднання лінійних та обертальних рухів • Компактна конструкція • Застосовуються для завантаження та транспортування деталей	• Висока швидкість та точність • Компактність • Найпоширеніші в електроніці та лабораторіях • До цього типу належить KS0198 4DOF	• 5–7 ступенів свободи • Найбільш схожі на руку людини • Використовуються в промисловості, медицині та логістиці	• Дуже висока швидкість • Невелика вантажопідйомність • Сортування та пакування продукції	• Працюють поруч із людиною • Оснащені системами безпеки • Використовуються на сучасних автоматизованих виробництвах



ВИСНОВОК: За результатами аналізу для медичної лабораторії було обрано **SCARA-маніпулятор KS0198 4DOF**, оскільки він поєднує компактність, достатню точність, простоту керування та низьку вартість. Це повністю відповідає вимогам лабораторних процесів.

Переваги та недоліки маніпулятора SCARA

Переваги SCARA



Висока швидкість



Висока точність



Компактність



Простота керування



Низька вартість

Недоліки SCARA



Обмежена робоча зона



Робота переважно
в площині X–Y



Обмежена орієнтація
захоплювача



Невелика
вантажопідйомність

Схеми підключень:

Були використані такі елементи, як плата Arduino Uno, сервоприводи та джойстик

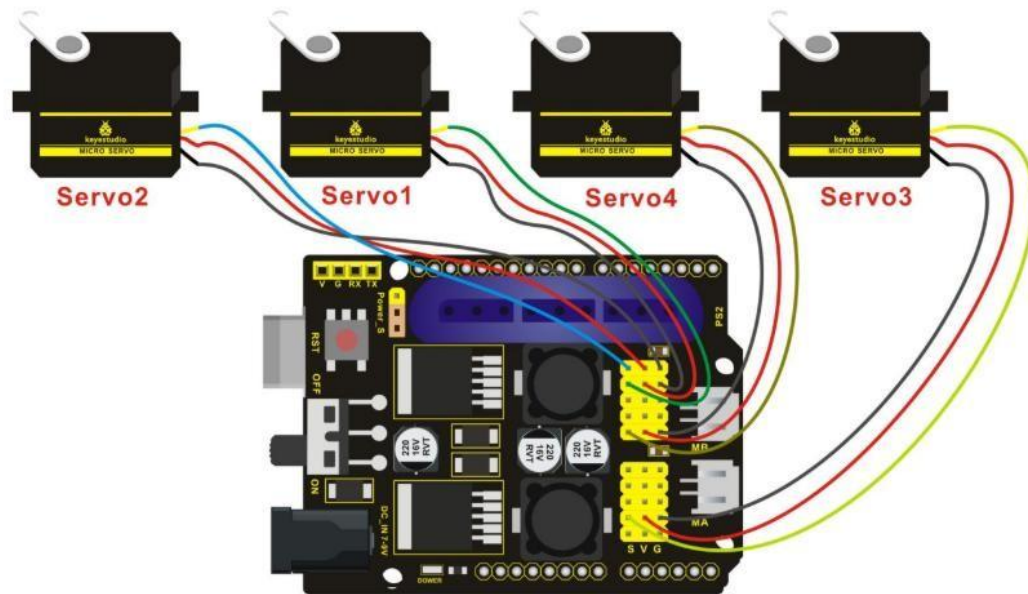


Схема підключення сервоприводів

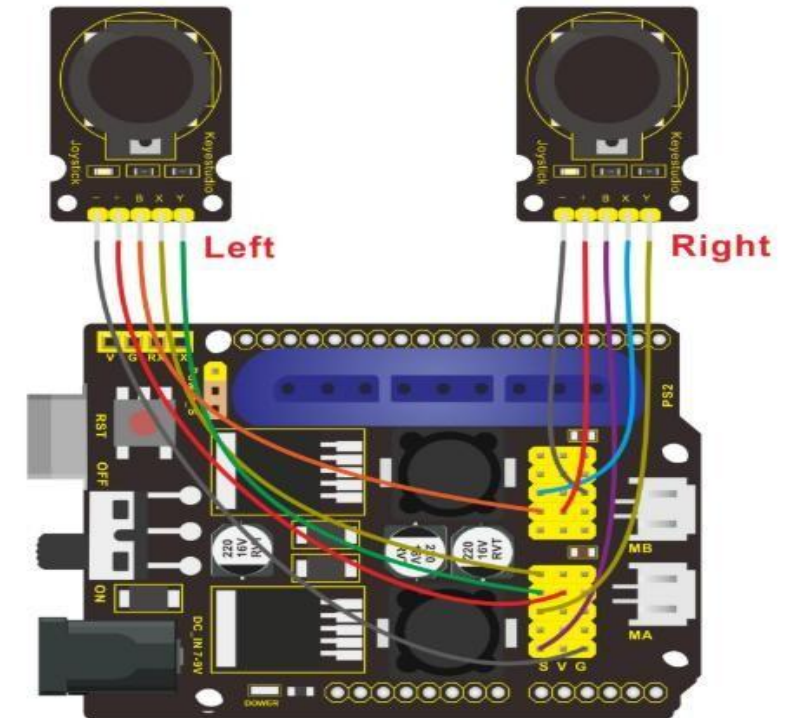
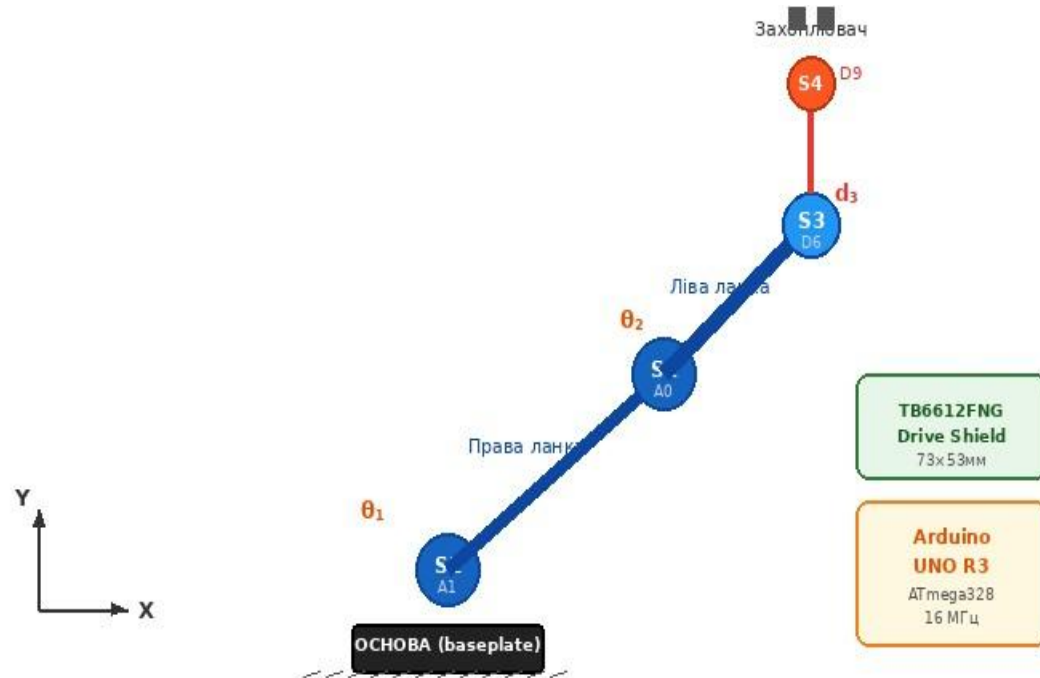


Схема підключення джойстика

Кінематична схема маніпулятора:



Маніпулятор KS0198 має такі кутові діапазони суглобів:
Servo 1 (обертання основи, пін A1): 0° – 180° , початкове 80° ;
Servo 2 (права рука, пін A0): 0° – 180° , початкове 60° ;
Servo 3 (ліва рука, пін D6): 35° – 180° , початкове 130° ;
Servo 4 (захоплювач, пін D9): 2° – 108° , початкове 0°

Алгоритм плавної інтерполяції:

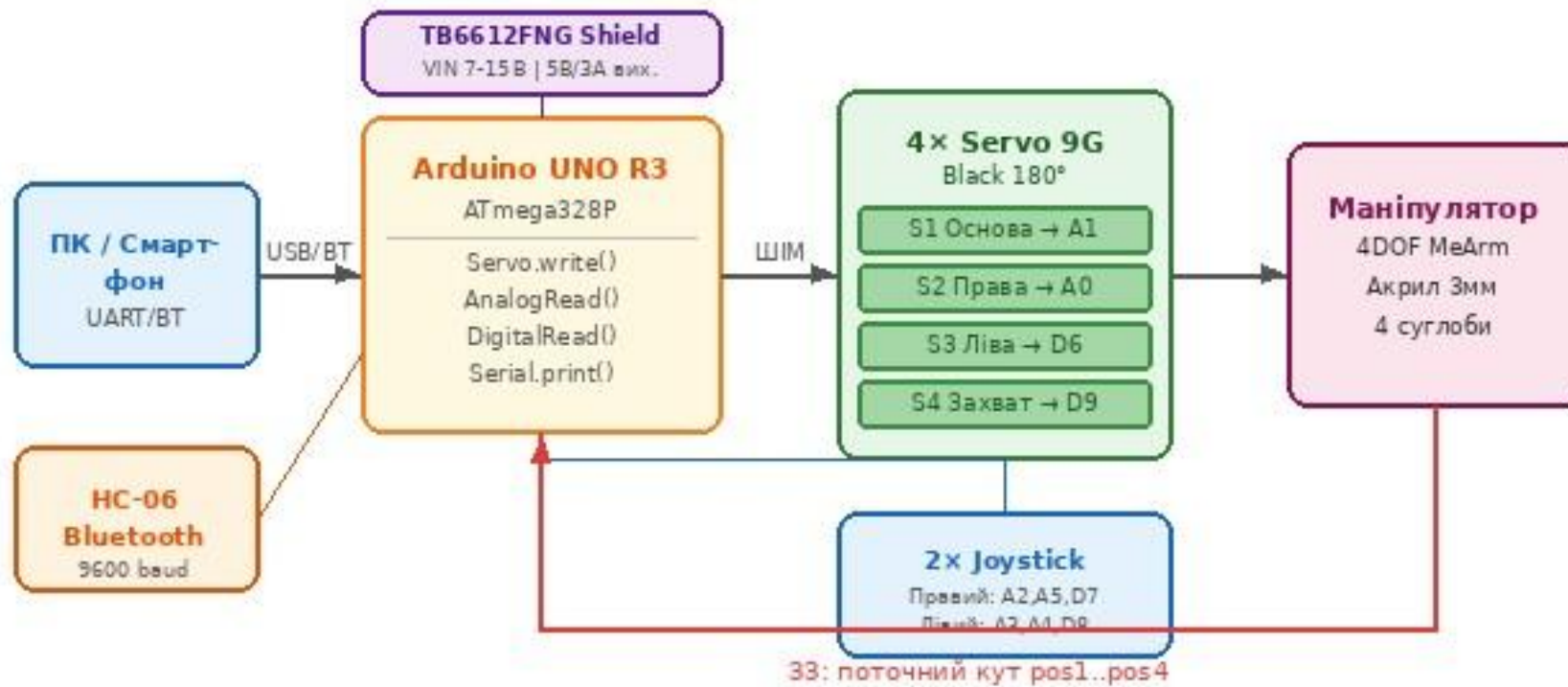
Для усунення ударних навантажень використано нормований поліном 4-го ступеня з нульовою швидкістю та прискоренням на початку й наприкінці руху.

Формула інтерполяції: $q(t) = q_0 + dq * (10*t^3 - 15*t^4 + 6*t^5)$, де $t \in [0,1]$, q_0 — початковий кут, dq — зміщення кута.

Практичний ефект: значне зниження ривків і різкого прискорення, плавність переходу між точками.

Інтеграція датчиків в інтелектуальні системи

- Сервоприводи: Основа → A1; Серво2 → A0; Серво3 → D6; Серво4 → D9.
- Джойстики: Праві осі → A2, A5; Ліві осі → A3, A4; Кнопки Z → D7 (запис), D8 (відтворення).



Висновки:

В результаті виконання дипломної роботи було:

- Досліджено теоретичні основи роботизованих маніпуляторів та проведено аналіз їхніх кінематичних схем. ➤ Проведено порівняльний аналіз кінематичних схем та обґрунтовано вибір SCARA-конфігурації для використання в медичній лабораторії.
- Розроблено автоматизовану систему керування маніпулятором KS0198 4DOF на базі Arduino UNO R3. ➤ Розроблено алгоритм плавної інтерполяції руху на основі полінома п'ятого ступеня та реалізовано функцію запам'ятовування позицій.
- Реалізовано багатоваріантне керування маніпулятором (джойстик, Bluetooth, відтворення збережених позицій).
- Експериментально підтверджено працездатність системи та досягнуто повторюваність позиціонування $\pm 0,4$ мм. ➤ Підтверджено економічну доцільність використання маніпулятора KS0198 для навчальних та дослідницьких лабораторій.

Результати дослідження підтверджують ефективність використання маніпулятора для автоматизації лабораторних маніпуляцій із біологічними зразками. Розроблена система забезпечує точне позиціонування, плавність руху та низьку вартість реалізації.

Апробація результатів:

✓ VII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT» (м. Київ, 2025 р.).

Всеукраїнська науково-технічна конференція «Технології цифрового розвитку: програмні системи та децентралізація»
(м. Київ, 2025 р.).

Дякую за увагу !

З повагою Омелько Я.В.