

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

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

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**  
перший (бакалаврський)  
(рівень вищої освіти)

Розроблення автоматизованого механічного маніпулятора для використання в умовах небезпечних виробничих процесів  
(тема)

Виконав:  
здобувач 3 року навчання, (скорочений  
строк навчання)  
групи АКТАКІТу-22-1  
Павло САВЧЕНКО  
(власне ім'я, прізвище)

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

Тип програми освітньо-професійна  
Освітня програма Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології  
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доцент Олена ЧАЛА  
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ  
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

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

"30" червня 2025 р.



Павло САВЧЕНКО

## ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_  
(підпис)

« 21 » квітня 2025 р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Савченку Павлу Миколайовичу \_\_\_\_\_  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Розроблення \_\_\_\_\_ автоматизованого \_\_\_\_\_ механічного  
маніпулятора для використання в умовах небезпечних виробничих процесів  
Затверджена наказом по університету від 21 травня 2025 р. № 405 СТ
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_
- 3.1 Функціональне призначення розробки. \_\_\_\_\_
- 3.2 Технічні характеристики вибраних компонентів. \_\_\_\_\_
- 3.3 Використання в небезпечних виробничих умовах. \_\_\_\_\_
- 3.4 Мова програмування C++ \_\_\_\_\_
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі вступ, обґрунтування актуальності роботи; визначення мети, предмету та об'єкту розробки аналіз промислових роботів та його компонентів, вибір елементної бази, розробка проекту, розробка макету, побудова принципіальної та структурної схеми, розробка алгоритму роботи програми, розробка коду роботи маніпулятора, висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Графічний матеріал у вигляді презентації- 10 арк. ф. А 4


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

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

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	30.05.2025	виконано
2	Аналіз літератури за темою	01.06.2025	виконано
3	Аналіз промислових маніпуляторів та його компонентів	10.06.2025	виконано
4	Вибір елементної бази та розробка проекту	15.06.2025	виконано
5	Розробка макету маніпулятора	25.06.2025	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	28.06.2025	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	01.07.2025	виконано
8	Подання роботи на рецензію	05.07.2025	виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	08.07.2025	виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	09.07.2025	виконано

Дата видачі завдання 21 квітня 2025 р.

Здобувач  Павло САВЧЕНКО  
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Олена ЧАЛА  
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 54 с., 4 табл., 32 рис., 1 дод., 20 джерел.

МАНІПУЛЯТОР, АВТОМАТИЗАЦІЯ, АЛГОРИТМ, ПРОЄКТУВАННЯ,  
ARDUINO, TINKERCAD.

Об'єкт розробки – автоматизація небезпечних виробничих процесів.

Предмет розробки – автоматизований механічний маніпулятор призначений для виконання завдань в умовах небезпечних виробничих процесів.

Мета роботи – автоматизація небезпечних виробничих процесів, шляхом розробки механічного маніпулятора з високим рівнем точності, надійності.

Методи розробки – поетапне виконання комплексу теоретичних і практичних дій, спрямованих на створення пристрою для роботи в небезпечному виробничому середовищі.

В кваліфікаційній роботі розроблено автоматизований механічний маніпулятор для використання в умовах небезпечних виробничих процесів. Здійснений аналіз існуючих промислових маніпуляторів та їх компонентів, розглянуті вибрані варіанти елементної бази.

Відбулася розробка структурної та принципової схеми роботи. Після чого розробка алгоритму керування та розробка програмного забезпечення маніпулятора.

Також, отримані результати роботи можна віднести до цілі сталого розвитку 8 «гідна праця та економічне зростання», а саме завдання 8.2 «Підвищувати ефективність виробництва на засадах сталого розвитку та розвитку високотехнологічних конкурентних виробництв», та завдання 8.5 «Сприяти забезпеченню надійних та безпечних умов праці для всіх працюючих, зокрема шляхом застосування інноваційних технологій у сфері охорони праці та промислової безпеки».

## **ABSTRACT**

Explanatory note: 54 p., 4 tables, 32 figures, 1 appendix, 20 sources.

MANIPULATOR, AUTOMATION, ALGORITHM, DESIGN, ARDUINO, TINKERCAD.

The object of development is automation of hazardous production processes.

The subject of development is an automated mechanical manipulator designed to perform tasks in hazardous production processes.

The purpose of the work is automation of hazardous production processes by developing a mechanical manipulator with a high level of accuracy and reliability.

Development methods are a phased implementation of a set of theoretical and practical actions aimed at creating a device for working in a hazardous production environment.

In the certification work, an automated mechanical manipulator for use in hazardous production processes was developed. An analysis of existing industrial manipulators and their components was carried out, selected options for the element base were considered.

The development of a structural and principle scheme of work was carried out. After that, the development of a control algorithm and the development of the manipulator software were carried out.

Also, the results of the work can be attributed to the Sustainable Development Goal 8 "Decent work and economic growth", namely task 8.2 "Increase production efficiency on the basis of sustainable development and the development of high-tech competitive industries", and task 8.5 "Promote reliable and safe working conditions for all workers, in particular through the use of innovative technologies in the field of labor protection and industrial safety".

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	8
Вступ.....	9
1 Аналіз промислових маніпуляторів та його компонентів .....	11
1.1 Загальні відомості про маніпулятори .....	11
1.2 Характеристика та класифікація маніпуляторів за типом схем.....	12
1.3. Різновидність систем управління маніпулятором в небезпечних виробничих середовищах .....	15
1.4 Аналіз плат Arduino.....	16
2 Вибір елементної бази та розробка проекту .....	22
2.1 Елементна база.....	22
2.2 Середовище розробки tinkercad .....	26
2.3 Процес розробки в середовищі tinkercad.....	27
3 Розробка макету маніпулятора.....	31
3.1 Побудова принципової схеми маніпулятора .....	31
3.2 Побудова структурної схеми маніпулятора.....	31
3.3 Розробка алгоритму роботи програми.....	33
3.4 Розробка коду роботи маніпулятора.....	37
3.5 Дослідження стійкості системи керування серводвигунами .....	41
3.6 Розроблений макет .....	43
3.7 Охорона праці .....	45
Висновки .....	47
Перелік джерел посилання .....	48
Додаток А Лістинг коду програми .....	50
Додаток Б Демонстраційний матеріал.....	51

## **ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ**

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

МК – мікроконтролер;

ПЗ – програмне забезпечення.

## ВСТУП

Системи управління промислових маніпуляторів – це сучасні апаратні та програмні комплекси, які використовуються для моніторингу та виконання технологічних заходів у важких для досягнення або небезпечних виробничих умовах. Їх застосування допомагає забезпечити безпеку працівників, покращити ефективність виробництва та дотриманням нових технологічних вимог. Автоматизована система управління маніпулятором надає повну інформацію про стан виконавчих механізмів, дозволяє швидко реагувати на зміну навколишнього середовища, автоматизувати виконання повторюваних або небезпечних заходів. Тому, з вище сказаного, можна вважати, що обрана тема є актуальною та своєчасною.

Об'єкт розробки – автоматизація небезпечних виробничих процесів.

Предмет розробки – автоматизований механічний маніпулятор призначений для виконання завдань в умовах небезпечних виробничих процесів.

Мета роботи – автоматизація небезпечних виробничих процесів, шляхом розробки механічного маніпулятора з високим рівнем точності, надійності.

Для досягнення цієї мети потрібні наступні кроки: аналіз літературних джерел, дослідження подібних продуктів та оцінка їх переваг та недоліків. Системна архітектура, схема організаційного контролю, вибір ключових виконавчих компонентів, накопичувачів, датчиків та програмного середовища проводилися на майбутніх етапах. Показано прототип роботи в Tinkercad, а програмне забезпечення було написано мовою Arduino C, яка включає алгоритм управління маніпулятором та взаємодіє з джойстиком, датчиками та серводвигунами. Заключний етап створив звіт, який враховував наукові джерела відповідно до кваліфікаційних вимог. Як результат, був побудований робочий прототип маніпулятора, який здатний працювати в складних умовах виробництва, значно зменшуючи фізичну присутність операторів у зоні небезпеки.

Кваліфікаційна робота оформлена згідно з ДСТУ 3008:2015 [1], та

положення про протидію академічному плагіату в ХНУРЕ [2], методичних вказівок [3], навчального посібника з кваліфікаційної роботи [4].

Проведені дослідження відповідають цілям сталого розвитку (ЦСР), а саме: ЦСР 8 [5].

# 1 АНАЛІЗ ПРОМИСЛОВИХ МАНІПУЛЯТОРІВ ТА ЙОГО КОМПОНЕНТІВ

## 1.1 Загальні відомості про маніпулятори

Науковий процес та сучасне виробництво є невід'ємними компонентами швидкого просування технологій. Вони виконують надзвичайно складні завдання з винятковою точністю, ефективністю та швидкістю, значно підвищуючи та продуктивність компанії.

Маніпулятор – це механічна система, яка поєднує механізм важеля, керований програмованим пристроєм або оператором. У сучасних реаліях ці механізми можуть замінити втручання людини до різних технологічних процесів, особливо тих, що становлять ризики для життя чи здоров'я.

Маніпулятори мають неабияке значення для високоточних галузей, включаючи автомобіль, електроніку, харчування та медичний сектор. Наука заохочує експерименти на мікроскопічному рівні, що виходить за межі можливостей людської руки.

Японія та Німеччина лідирують серед світового ринку роботів, вони надають більше половини світового попиту. На даний час в Україні індустрія робототехніки починає зростати, через наявність можливості мінімізувати небезпеку для життя працівників, а в воєнний час, тим паче, є попит для зменшення витрат та гарантування стабільності технологічних процесів, при виконанні якого, зменшуються ризики для життя людини [6].

Маніпулятори відіграють вирішальну роль у формуванні промислового майбутнього. Це не тільки підвищує продуктивність та безпеку виробництва, але й сприяє просуванню нових технологій, створюючи можливості для інновацій.

Промислові маніпулятори – це автоматизовані механічні пристрої, які виконують функції захоплення, переміщення, обробки або укладання об'єктів у різних сферах виробництва. Сучасні автоматизовані системи покладаються на них

для виконання завдань, які вимагають високої точності, швидкості та повторення.

Маніпулятори можуть працювати у складних та небезпечних умовах, де участь людини небезпечна або неможлива.. Завдяки багатьом ступеням свободи, вони можуть імітувати рухи людської руки, виконуючи різні операції у тривимірному просторі. Основою керування маніпулятором є мікроконтролер або інша система управління, яка забезпечує виконання заданих програм. У більш складних системах маніпулятори інтегруються в роботизовані комплекси, які працюють синхронно з іншими машинами, що підвищує загальну ефективність виробництва. Вони активно застосовуються в автомобілебудуванні, електроніці, хімічній, металургійній, харчовій та фармацевтичній промисловості [7].

## 1.2 Характеристика та класифікація маніпуляторів за типом схем

Маніпулятори відіграють вирішальну роль у автоматизованих системах, які можуть виконувати різні технологічні завдання в різних умовах виробництва, навіть у небезпечних умовах. Щоб гарантувати повну функціональність у тривимірному просторі, маніпулятор повинен мати щонайменше три ступені свободи. Кожен ступінь оснащений власним приводом, що дозволяє точно переміщувати робоче тіло.

В сучасних маніпуляторах використовують електромеханічні, гідравлічні, пневматичні або комбіновані приводи. Існує велика кількість схем маніпуляторів, найбільш поширеними в промисловості є чотири наступних схеми.

Розглянемо сферичний тип маніпуляторів (рис. 1.1). Маніпулятор, що функціонує в сферичній (або полярній) координатній системі. Його захват може висуватися і втягуватися. Вертикальний рух маніпулятора здійснюється шляхом обертання його у вертикальній площині всередині «плечового» суглоба. Весь вузол маніпулятора також може обертатися навколо осі підставки. Діапазон впливу цього пристрою являє собою усічену сферу [8-9].

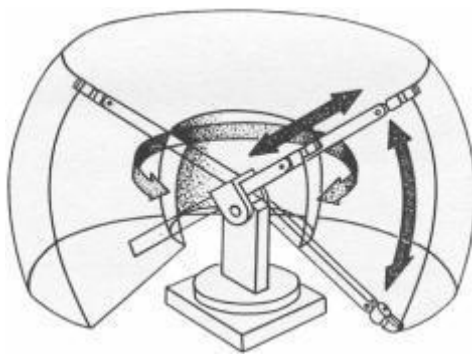


Рисунок 1.1 – Сферичний тип [8-9]

Маніпулятор в декартовій системі функціонує досить просто в управлінні та має високу точність. Маніпулятор виконує рухи вздовж трьох первинних осей:  $x$ ,  $y$  і  $z$  (рис 1.2) [11].

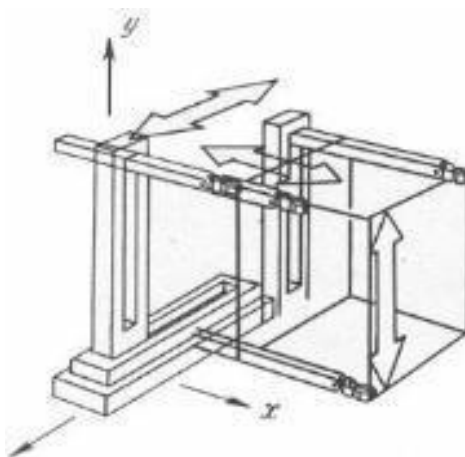


Рисунок 1.2 – Декартовий тип [11]

Захват маніпулятор, що працює в циліндричній системі координат може висуватися і втягуватися, а також регулюватися вгору і вниз уздовж. Крім того, весь вузол маніпулятора повертається навколо осі підставки, але не на повний оберт, що дозволяє йому виконувати операції в навколишній циліндричній зоні (рис 1.3) [12].

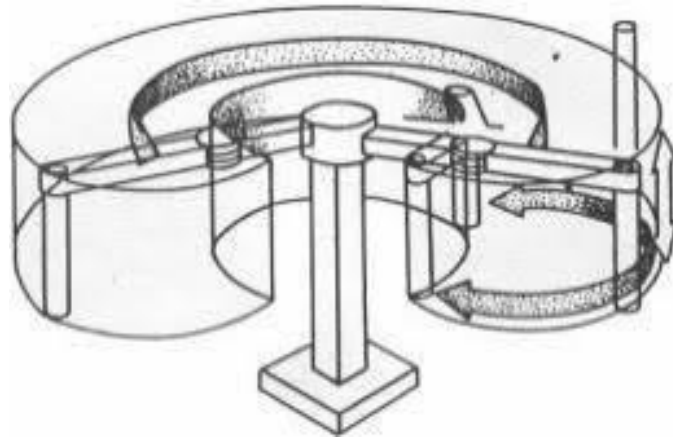


Рисунок 1.3 – Циліндричний тип [12]

Маніпулятор, що діє в ангулярній системі координат, не володіє прогресивними кінематичними парами, а натомість складається лише з обертальних кінематичних пар.

Цей тип маніпулятора схожий на руку людини, оскільки він має суглоб «плече» та «ліктя», а також суглоб «зап'ястя». Його область обслуговування значно більша, ніж в інших типах роботів.

Він має можливість орієнтуватися навколо перешкод різними способами і навіть для створення, але в той же час в управлінні надзвичайно складно (рис 1.4) [12].

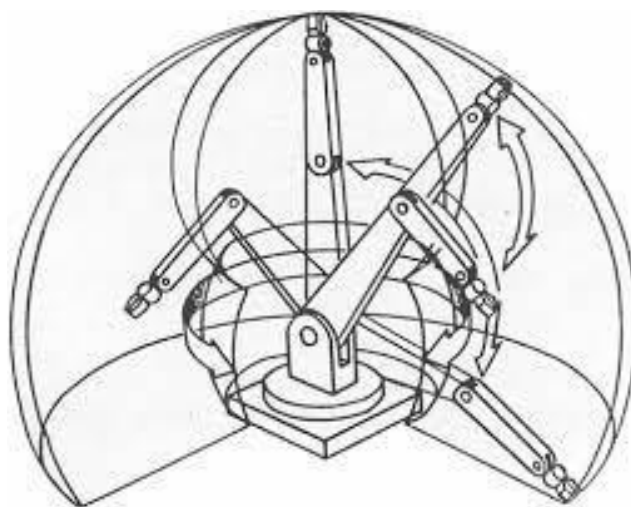


Рисунок 1.4 – Ангулярний тип [12]

### 1.3 Різновидність систем управління маніпулятором в небезпечних виробничих середовищах

В небезпечному виробничому середовищі маніпулятори забезпечуються вдосконаленими системами управління, які забезпечують точне та надійне виконання завдань.

Ці системи складаються з підсистем, що обробляють інформацію, переміщення компонентів, заходів безпеки, аварійних протоколів, обмежень області та запобігання помилкам у роботі.

Це особливо важливо в ситуаціях, коли людина не має можливості або не повинна бути присутня, наприклад, у гарячковій зоні, небезпечному середовищі або площі з високим рівнем радіації.

У цих системах використовуються різні типи механізмів управління. Контроль циклу стосується розташування дій, але він не диктує точну позицію та швидкість у програмі – ці параметри встановлюються безпосередньо на маніпулятор, а швидкість визначається характеристиками приводу.

Може відбуватися переміщення виконавчого механізму з одного місця в інше, де координати точок вказані в програмі, але швидкість між ними не регулюється. У технологічній роботі використовується контурний контроль для керування рухом по заздалегідь визначеному шляху, що дозволяє при необхідності коригувати швидкість. У програмі в цьому випадку передбачені як траєкторії, так і режими руху.

Також потрібно відзначити адаптивне керування. Воно запускає автоматичні коригування в програмах управління, коли спостерігається зміна параметрів для роботи маніпулятора. За допомогою спеціальних датчиків система може визначати форму, положення або стан об'єкта і відповідно змінювати дії маніпулятора.

Пристрій управління, який є основним компонентом системи, отримує сигнали від датчиків і виконує команди управління для накопичувачів. Пульт може отримувати сигнали, що вказують на завершення операцій, порушення

режимів або несправність. Також, пристрій управління має можливість збирати дані із зовнішніх систем або датчиків, найчастіше з тих, що стосуються обладнання, яким керує маніпулятор [13]. У більш складних виробничих системах система керування роботом часто інтегрована з більш загальною комп'ютерною мережею або центральною ЕОМ, яка координує роботу всієї виробничої ділянки. За допомогою цієї ієрархічної структури можна досягти високого рівня автоматизації та безпеки, що є особливо важливим при виконанні робіт у небезпечних умовах.

#### 1.4 Аналіз плат Arduino

Arduino – це відкрита апаратна платформа, яка широко використовується для створення систем управління роботами, безпосередньо маніпуляторами, особливо на етапі створення реалізації навчальних і аматорських проектів. Arduino є простим у використанні, має велику спільноту підтримки та доступність різних типів плат для вирішення завдань різної складності.

Arduino Uno (рис. 1.5) – це найпопулярніша модель плат Arduino. Завдяки чіпу ATmega328 і наявності достатньої кількості цифрових та аналогових входів/виходів, Uno ідеально підходить для управління звичайними маніпуляторами. За допомогою цієї плати можна реалізувати базові функції руху, обробку даних з датчиків і управління захопленням [14].

Arduino Leonardo (рис. 1.6) , що базується на мікроконтролері ATmega32u4, має вбудовану підтримку USB, та використовується як імітація комп'ютерних пристроїв введення, таких як миша чи клавіатура. Це дозволяє реалізовувати додаткові можливості в системах, де робот має взаємодіяти безпосередньо з ПК.



Рисунок 1.5 – Arduino Uno [14]

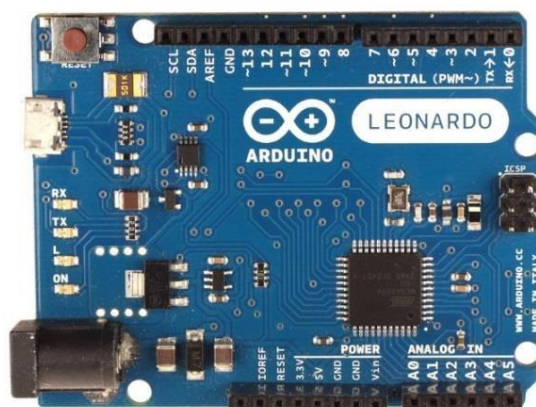


Рисунок 1.6 – Arduino Leonardo [14]

За допомогою Arduino Ethernet (рис. 1.7) можна підключати маніпулятор до локальної мережі, що важливо для віддаленого контролю або інтеграції в мережеві системи автоматизації. Підтримка живлення через Ethernet (POE) робить плату більш функціональною, в умовах обмеженого доступу до джерел електроенергії.

Arduino Mega 2560 (рис. 1.8) – це потужна плата, яка забезпечує велику кількість входів/виходів, що особливо корисно для складних маніпуляторів із багатьма ступенями свободи та численними сенсорами. Завдяки великому об'єму

пам'яті та кільком UART портам, вона здатна управляти одразу кількома пристроями [14].

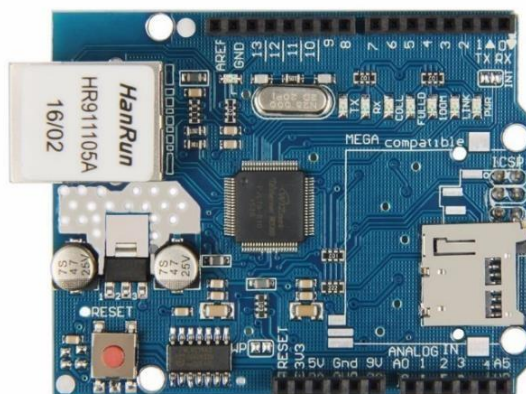


Рисунок 1.7 – Arduino Ethernet [14]

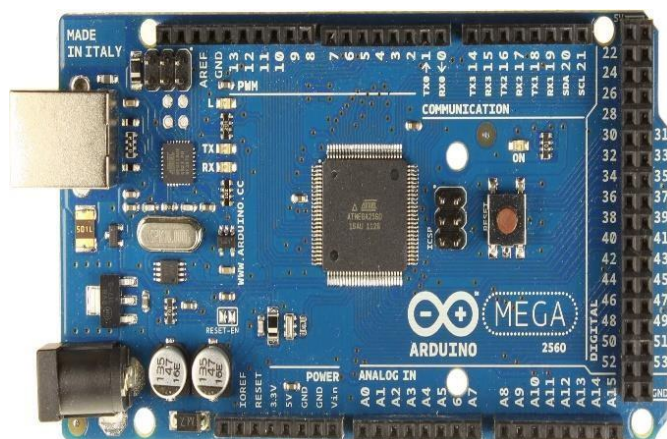


Рисунок 1.8 – Arduino Mega 2560 [14]

Arduino Mini і Arduino Micro (рис. 1.9), (рис. 1.10) – це плата невеликих розмірів, які ідеально підходять для інтеграції у малі роботи або в пристрої, де важлива економія місця. Незважаючи на свої розміри, вони зберігають достатню функціональність для базового керування маніпулятором [14].

Arduino Due (рис. 1.11) – це найпотужніша плата з усієї лінійки, побудована на 32-бітному ARM Cortex-M3 процесорі.

Вона забезпечує високу швидкість обробки даних і підходить для складних маніпуляційних задач.



Рисунок 1.9 – Arduino Mini [14]



Рисунок 1.10 – Arduino Micro [14]



Рисунок 1.11– Arduino Due [14]

Arduino Nano (рис. 1.12) – ще одна мініатюрна плата, що поєднує компактність з широкою функціональністю. Вона чудово підходить для вбудованих рішень, де немає місця для повнорозмірної плати, але необхідно зберегти сумісність з Uno [14].

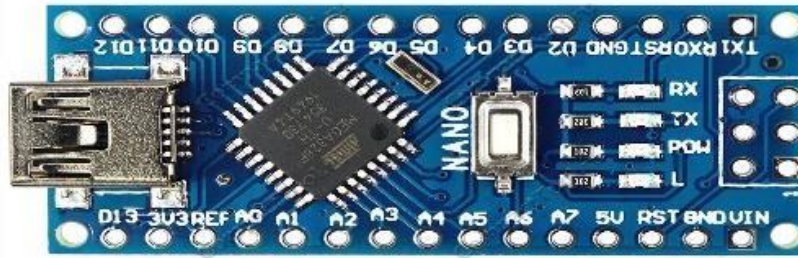


Рисунок 1.12– Arduino Nano [14]

Вибір плати Arduino напряму залежить від складності маніпулятора, вимог до обробки інформації та умов роботи пристрою, кількості необхідних входів/виходів.

У випадку використання маніпуляторів у небезпечних виробничих умовах, Arduino Uno або Due будуть достатньо продуктивними і дозволить розширити комунікаційні можливості, тоді як Mini або Nano можуть бути частиною вбудованих сенсорних блоків або допоміжних систем.

Аналіз технічного завдання свідчить, що розробка автоматизовано механічного маніпулятора для використання в умовах небезпечного виробництва потребує створення надійної та гнучкої системи, здатної забезпечити точне управління та контроль сервоприводами, зчитування сигналів з джойстику, а також виконання команд за визначеним алгоритмом.

Дуже важливу роль відіграє розробка зручного способу керування для оператора, що дозволить легко маневрувати та переміщати маніпулятор, задаючи параметри руху та контролювати виконання завдань.

Таким чином, аналіз технічного завдання дозволяє визначити основні вимоги до функціональності, безпеки, гнучкості та надійності програмного забезпечення для роботизованого маніпулятора.

З проведеного аналізу було вирішено використовувати Arduino Uno. Вона є досить простою у використанні, має достатню кількість пінів та задовільні технічні характеристики.

## 2 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ ТА РОЗРОБКА ПРОЕКТУ

### 2.1 Елементна база

Для демонстрації можливостей маніпулятора необхідно зібрати його зменшений макет, що дозволить задовольнити потребу демонстрації за більш малий бюджет.

Далі дані про можливі варіації комплектування макету промислового маніпулятора результати занесемо до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Комплектуючі, використані при розробці маніпулятора

Найменування		Кл.шт.
1	Макет маніпулятора та його комплектуючі	1
2	Сервопривод та його комплектуючі	4
3	Блок живлення	1
4	Плата мікроконтролерів	1
5	Плата з контролером керування сервоприводами	1

Вибір комплектуючих є досить важливим етапом створення проекту, але на даний час, це не створює жодних проблем, адже наявний широкий спектр доступних елементів, що стосуються електроніки та конструктивних елементів маніпулятору .

Властивості вибраної плати, а саме Arduino Uno (рис.2.1), занесемо до таблиці 2.2 [29].

Таблиця 2.2 – Відомості про плату МК [14]

Arduino Uno	
Частота роботи мікроконтролера, МГц	16 МГц
Flash Memory, Кб	32 Кб
Цифрові входи та виходи	14,6
Аналогові входи	6
Напруга живлення, В	7В–12 В
Розміри, мм	68мм x 53мм x 15мм



Рисунок 2.1 – Графічне зображення плати та шнуру живлення [14]

Далі було обрано керуючий двигун. Для повноцінного функціонування робота був обраний сервопривод SG90 (рис. 2.2), його параметри занесли в таблицю 2.3 [15].

Наступним кроком було обрання керуючого механізму. Для повноцінної реалізації потенціалу роботи маніпулятора потрібен добре розвинутий контролер. Був обраний PWM контролер SZFYDOSH, який найбільше підходить для проекту (рис. 2.3), відомості про нього занесені до таблиці 2.4.

Таблиця 2.3 – Відомості про сервопривод SG90 [15]

Сервопривод SG90	
Кут повороту, градуси	90 градусів
Температурний діапазон, С	0-50°C
Робоча напруга, В	3,5-5 В
Споживаний струм в русі, мА	50-80 мА
Споживаний струм в утриманні, мА	5-10 мА
Розмір, см	3,3 см x 3 см x 1.3 см
Вага, г	9 г
Швидкість без навантаження, сек/град.	0,12 сек/60 град. при 4.8В

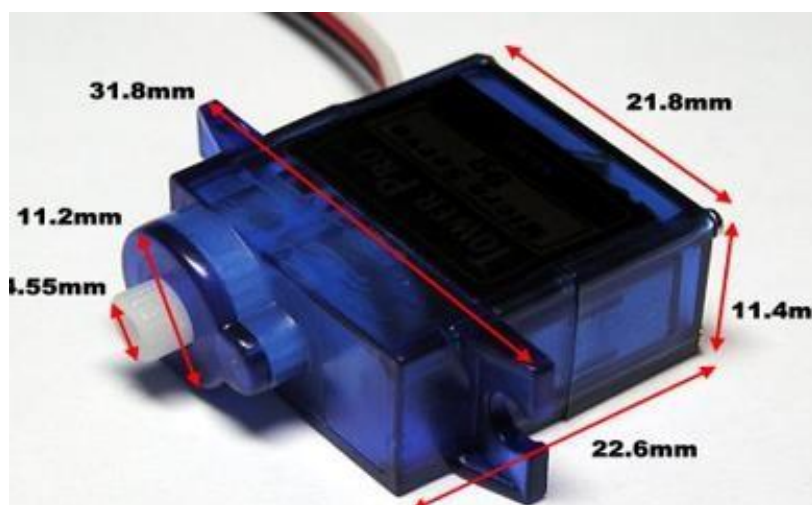


Рисунок 2.2 – Графічне зображення Сервоприводу SG90 [15]

Таблиця 2.4 – Відомості про контролер SZFYDOSH зі стіками

PWM контролер	
Кількість каналів	16
Розрядність	12
Частота, Гц	24-1526Гц
Кут повороту, градуси	120 0

За допомогою PWM контролера можна керувати сервоприводами, обертами двигунів та іншими пристроями, де PWM сигнал використовується для керування.

На останньому етапі був обраний блок живлення, за допомогою якого можна подавати напругу на маніпулятор. Для даних сервоприводів було застосовано 5 В, та 1,5 А. Було вирішено встановити нижню планку напруги для

сервоприводів, щоб не пошкодити PCA контролер, через який і подається живлення.



Рисунок 2.3 – Графічне зображення PWM контролера SZFYDOSH [15]

Найголовніший елемент конструкції став корпус макету. На даний момент доступна вже створена велика кількість маніпуляторів різних конструкцій, але я обрав саме такий (рис. 2.4), (рис 2.5).

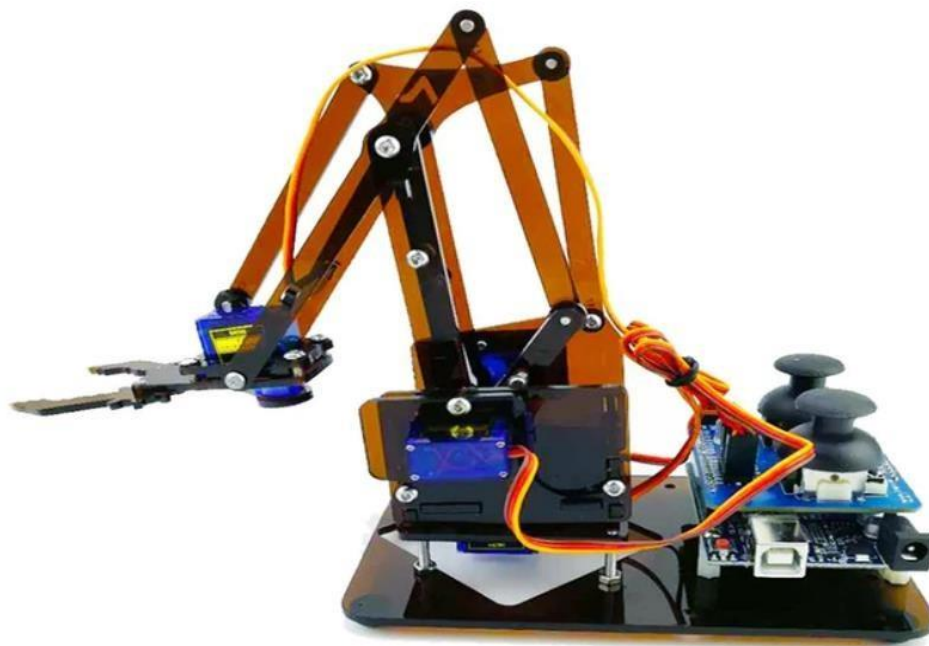


Рисунок 2.4 – Графічне зображення корпусу макета маніпулятора [15]



Рисунок 2.5 – Зображення розмірів корпусу макета маніпулятора [15]

## 2.2 Середовище розробки Tinkercad

Tinkercad є безкоштовним онлайн-сервісом для створення тривимірних моделей, електронних схем та програмування мікроконтролерів, зокрема на базі платформи Arduino. Розроблений компанією Autodesk, цей ресурс широко застосовується як у сфері освіти, так і в аматорському проектуванні, завдяки своїй доступності, простоті використання та багатофункціональності [16].

Середовище Tinkercad не вимагає встановлення спеціалізованого програмного забезпечення та працює безпосередньо в браузері, що робить його зручним для використання на будь-якому комп'ютері з доступом до інтернету. Платформа підтримує три основні модулі: 3D-дизайн, моделювання електронних схем (Tinkercad Circuits) та блокове програмування (Codeblocks). Особливу цінність для розробки робототехнічних проектів становить розділ Circuits, який дозволяє користувачеві створювати електронні схеми, запускати симуляції та тестувати програмний код Arduino в режимі реального часу.

До переваг Tinkercad можна віднести інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, велику бібліотеку готових компонентів, інтеграцію з 3D-друком та можливість спільної роботи над проектами. Завдяки цьому платформа є ефективним інструментом для навчання основам електроніки, схемотехніки та програмування,

а також для створення і перевірки прототипів пристроїв перед їх фізичною реалізацією [16].

## 2.3 Процес розробки в середовищі Tinkercad

Для початку відкриємо середовище Tinkercad, та створимо новий проект, далі у нас з'явиться повністю пусте вікно новоствореного проекту (рис. 2.6).

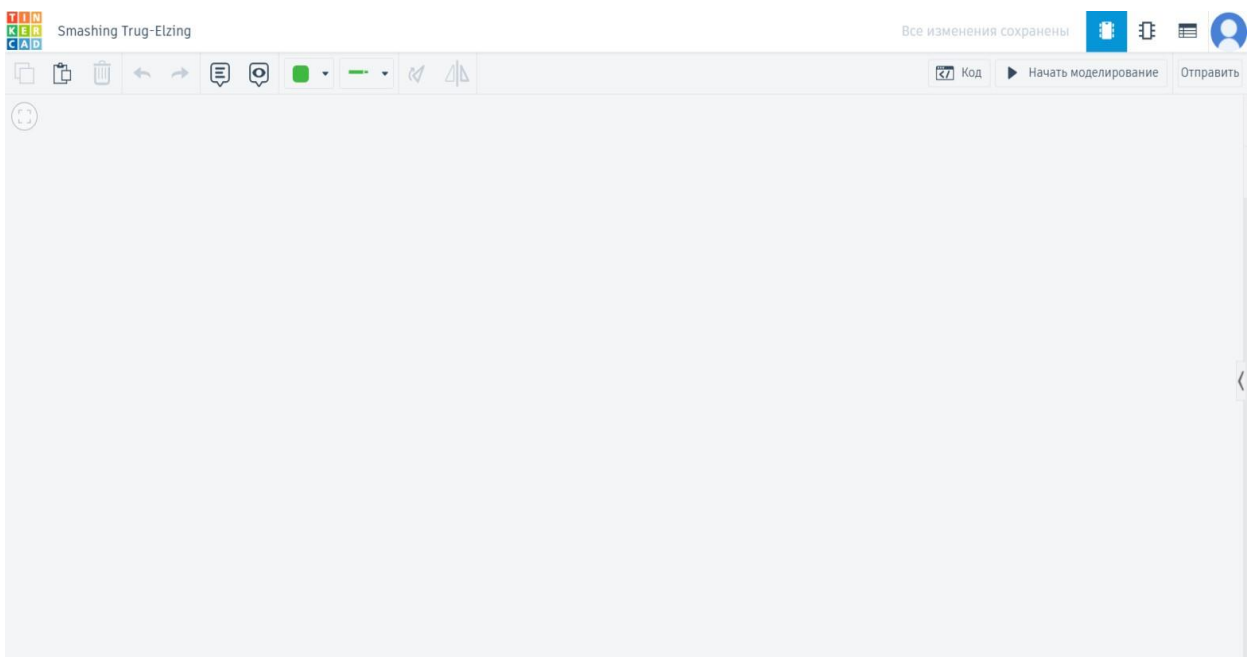


Рисунок 2.6 – Зображення вікна новоствореного проекту

Далі додаємо основні макетні елементи, а саме плату МК та дві малих макетних плати (рис. 2.7).

Після чого додаємо тримач для батарей з 3 батареями по 1.5 V кожна, 4 сервоприводи та 4 резистори-потенціалометри, які будуть виконувати роль джойстика для управління маніпулятором (рис. 2.8).

Наступним кроком ми задаємо підключення всіх компонентів проекту (рис. 2.9).

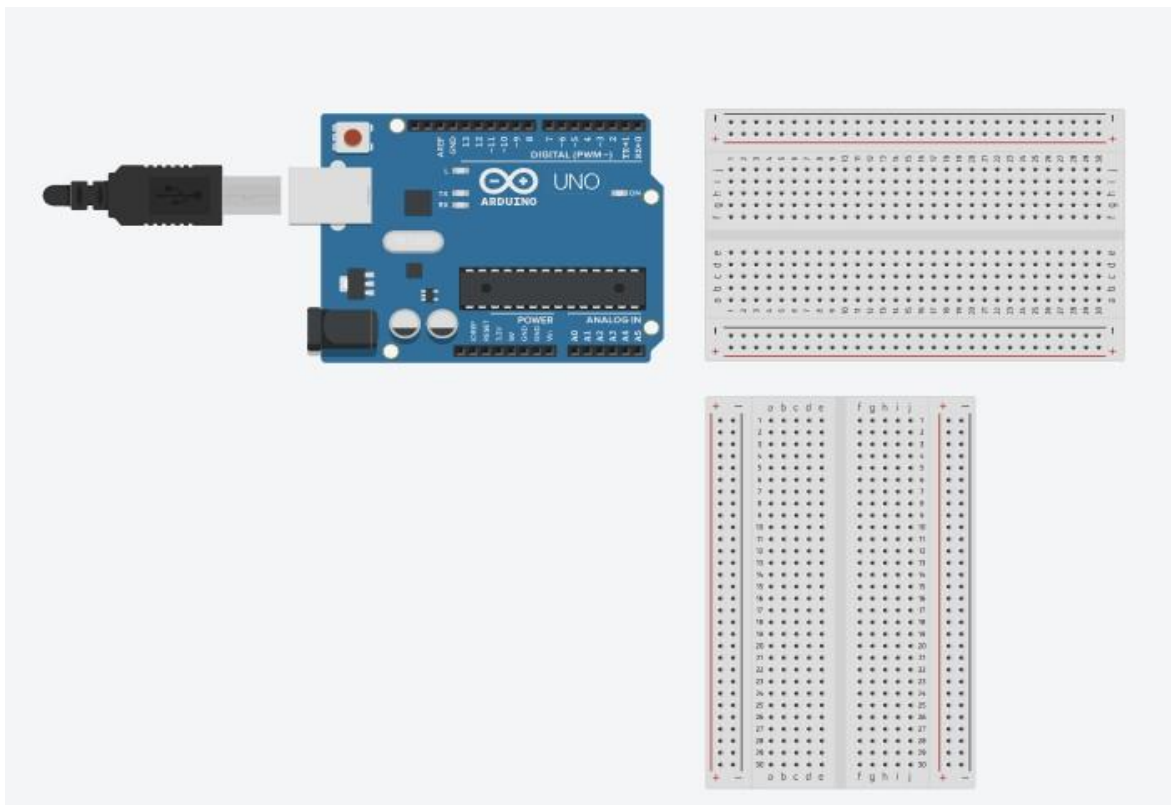


Рисунок 2.7 – Зображення вікна з платою МК та макетними платами

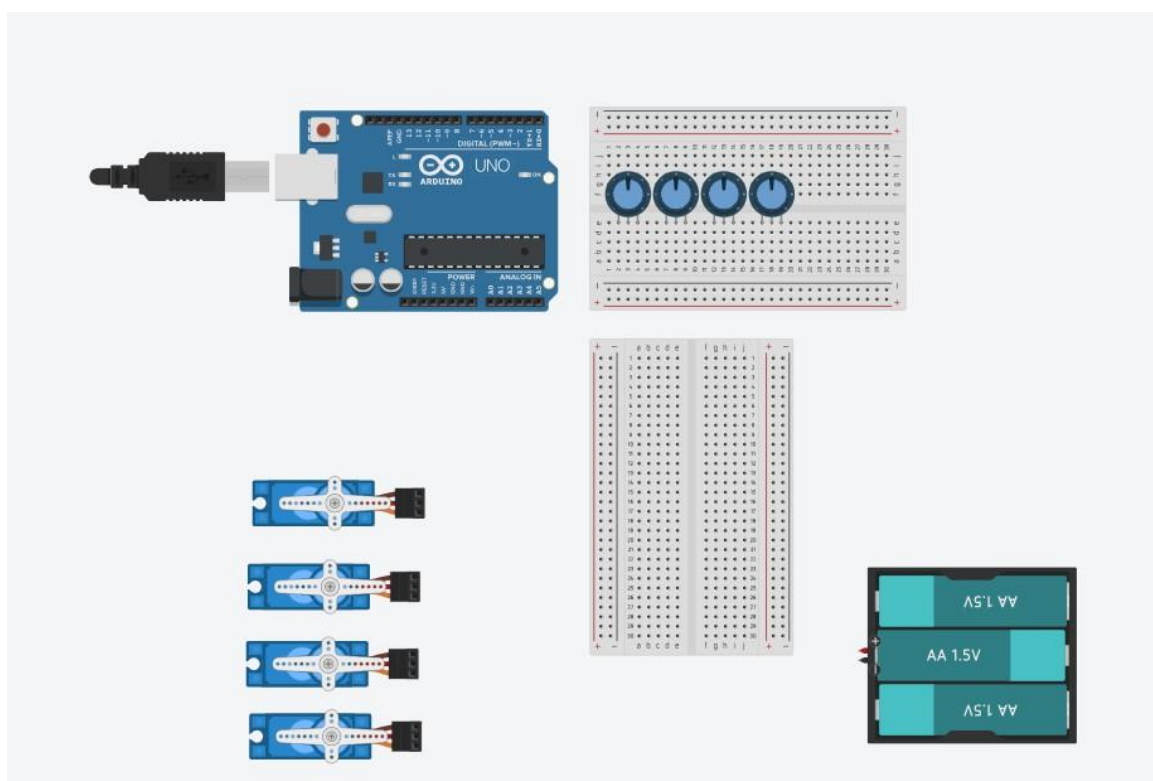


Рисунок 2.8 – Зображення вікна з платою МК, макетними платами, тримачем для батарей з 3 батареями по 1.5 V кожна, 4 сервоприводами та 4 резисторами-потенціалометрами

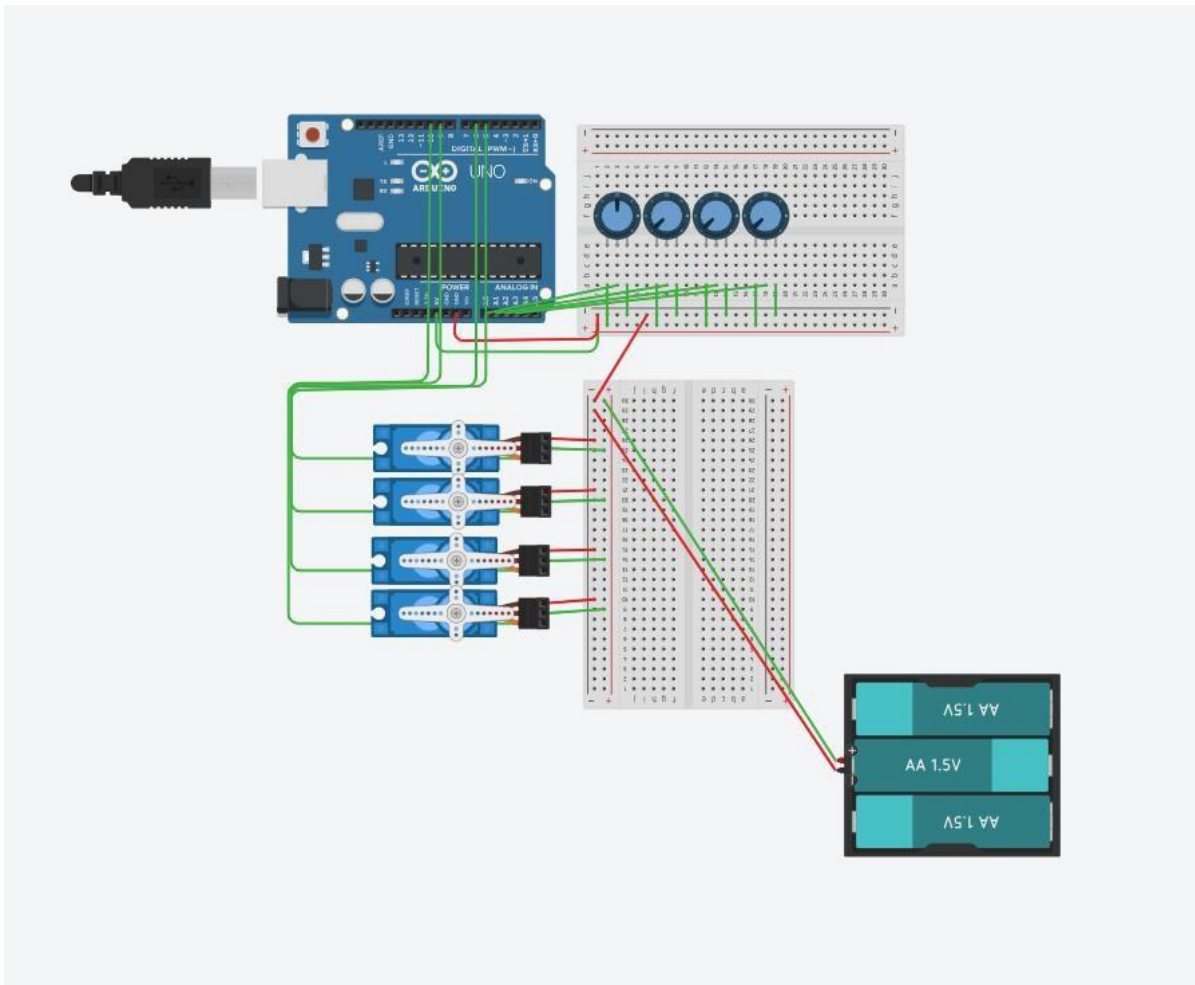


Рисунок 2.9 – Проект маніпулятора в середовищі Tinkercad

Залишився фінальний етап – написання коду для роботи програми. Після написання, потрібно додати його в вікно «Код», та запустити моделювання програми, натиснувши на кнопку «Почати моделювання».

У цьому розділі було розібрано питання вибору елементної бази для створення макету маніпулятора, що дозволяє реалізувати основні можливості автоматизованого управління з використанням доступних і бюджетних компонентів. Було обрано МК Arduino Uno, серводвигуни SG90, блок живлення, PWM-контролер SZFYDOSH та корпус із готового комплекту,

Усі технічні характеристики елементів були проаналізовані та зафіксовані у відповідних таблицях, що дозволяє забезпечити відповідність обраних компонентів до функціональних вимог проекту.

Також було виконано створення проекту в середовищі Tinkercad. Простота та наочність інтерфейсу Tinkercad сприяли швидкому тестуванню роботи

програмного коду без потреби у фізичних компонентах. Це скоротило час розробки та дало розуміння, що саме я хочу розробити в цьому проекті. Таким чином, було закладено надійну основу для подальшої фізичної реалізації маніпулятора.

## 3 РОЗРОБКА МАКЕТУ МАНІПУЛЯТОРА

### 3.1 Побудова принципової схеми маніпулятора

Принципова схема маніпулятора (рис. 3.1), складається з МК Arduino, чотирьох потенціометрів (які імітують джойстики) для управління роботом, контролера ШІМ-сигналів (РСА9685) та чотирьох сервоприводів SG90, що виконують роль двигунів. Усі ці елементи підключені до джерела живлення з напругою 5 В.

Потенціометри підключено до аналогових входів мікроконтролера і слугують для втілення різних маніпуляцій з управлінням роботом. На основі цих значень Arduino формує команди, які передаються на відповідні серводвигуни.

В самому проекті, роль потенціометрів відіграє PWM-контролер, за допомогою якого є можливість більш точно керувати кутом обертання кожного з сервоприводів. Кожен двигун отримує живлення та сигнал управління окремо, або ж їх можна поєднувати та варіювати, а загальна «земля» з'єднує всі компоненти системи для забезпечення стабільної роботи.

Схема демонструє основний принцип побудови системи дистанційного керування маніпулятором, в розробці якого було використано бюджетні та широко доступні компоненти.

### 3.2 Побудова структурної схеми маніпулятора

Структурна схема (рис. 3.2) маніпулятора поєднує в собі головні функціональні блоки системи. Вона складається з трьох основних функціональних блоків: оператор, або в автоматизованій системі це керуюча машина, виконуючої системи керуючої машини (контролер управління) та самої виконуючої машини (блоку живлення та сервоприводів, які безпосередньо керують ланками маніпулятора).

Взаємодія між цими блоками забезпечує повноцінну роботу системи. Користувач задає різні положення джойстиків, тим самим реалізує контроль над виконуючою системою керуючої машини, що відображається в зміні напруги на відповідних входах контролера. Контролер обробляє отримані сигнали, та передає ці сигнали на сервоприводи, тобто до виконуючої машини.

Сервоприводи, відповідно до команд контролера, обертають окремі суглоби маніпулятора, реалізуючи точне позиціонування. Це дозволяє виконувати рух у небезпечних або недоступних зонах без участі людини.

Структурна схема має на меті забезпечити загальне розуміння того, як працює маніпулятор, підкреслюючи його основні принципи та взаємодію між його внутрішніми системами.

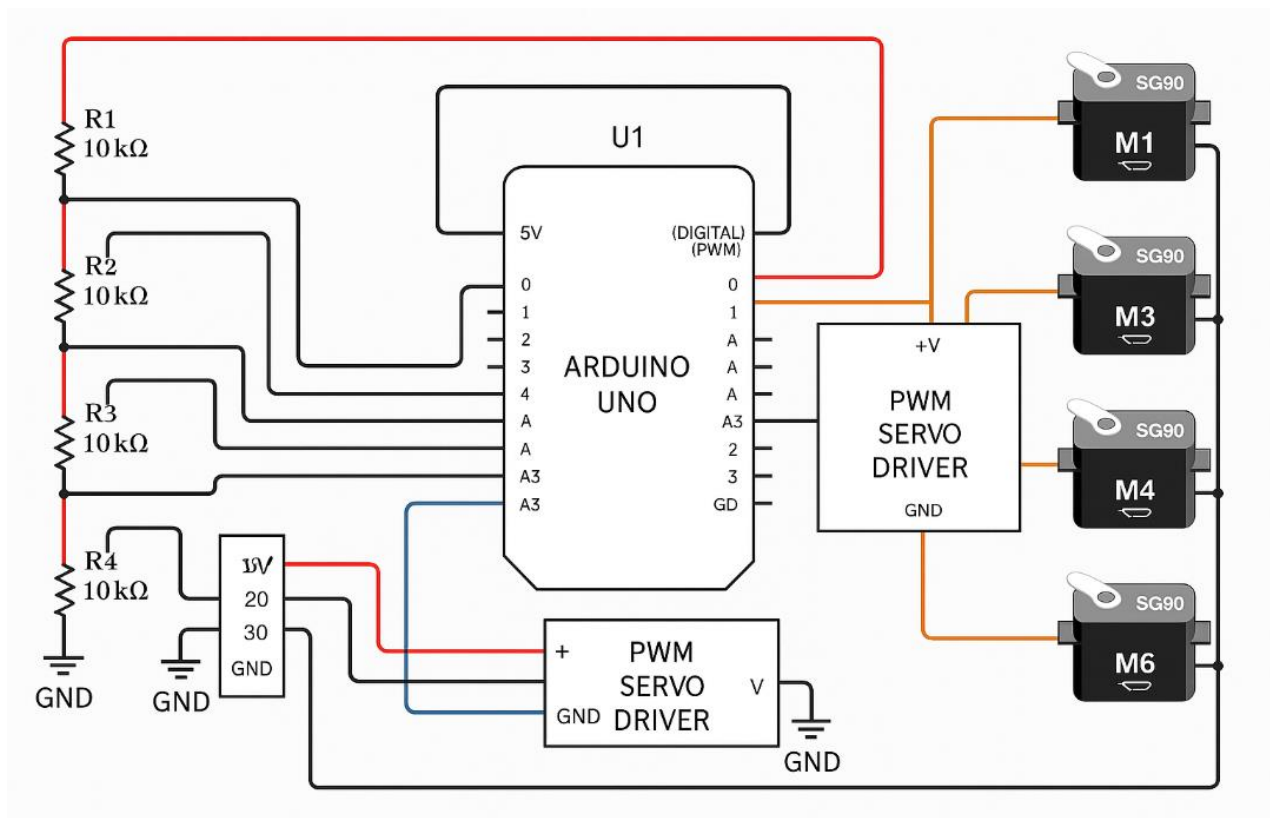


Рисунок 3.1 – Принципова схема

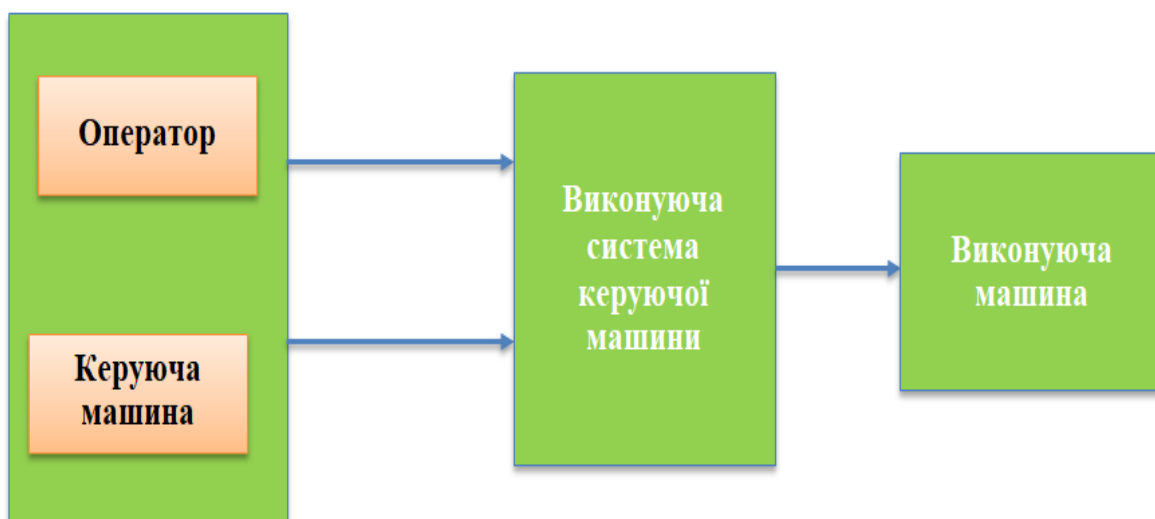


Рисунок 3.2 – Структурна схема

### 3.3 Розробка алгоритму роботи програми

Розробка алгоритму роботи програми є основою створення проекту маніпулятора.

Алгоритм являє собою чітке розуміння роботи програми, він показує, наскільки дії чітко та у вірному порядку виконуються одна за одною.

Без алгоритму код писатиметься хаотично – це призводить до помилок, зависань або неправильного керування.

Першим кроком потрібно задати зчитування та масштабування значень, це створюється за допомогою функцій `value` та `map()` відповідно (рис. 3.3).

Далі ми маємо 4 перевірки: якщо значення не дорівнює 13, то відповідна змінна `value` отримує 15 (рис. 3.4).

Наступним кроком є задавання і обмеження змінних `for servo`, які використовуються для керування сервоприводами (рис. 3.5– рис. 3.6).

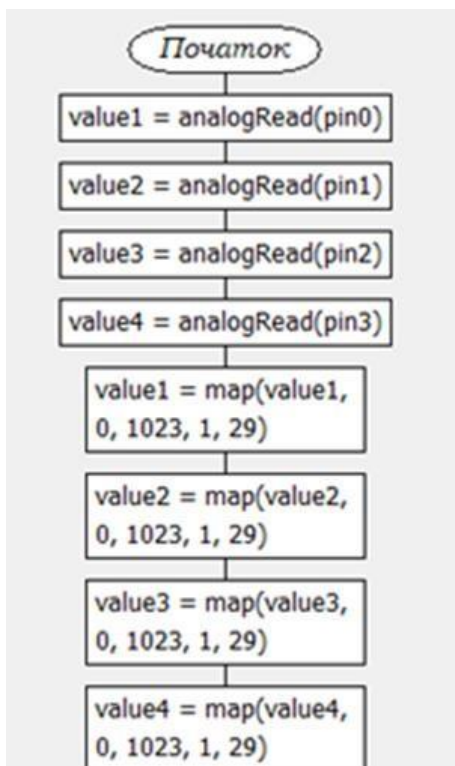


Рисунок 3.3 – Фрагмент алгоритму програми

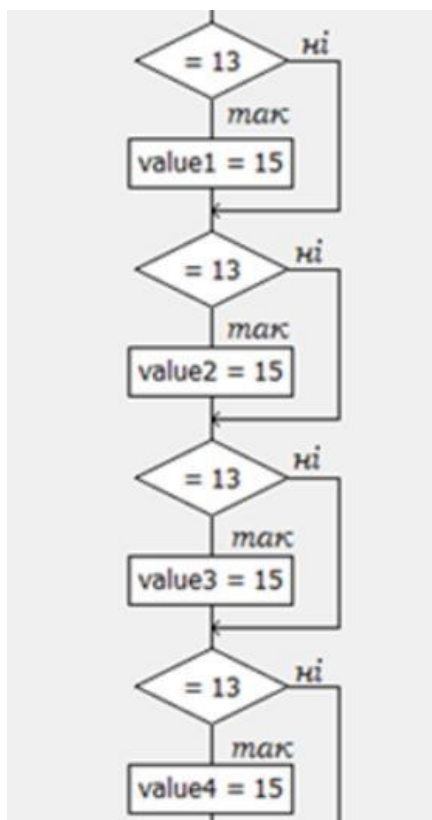


Рисунок 3.4 – Фрагмент алгоритму програми

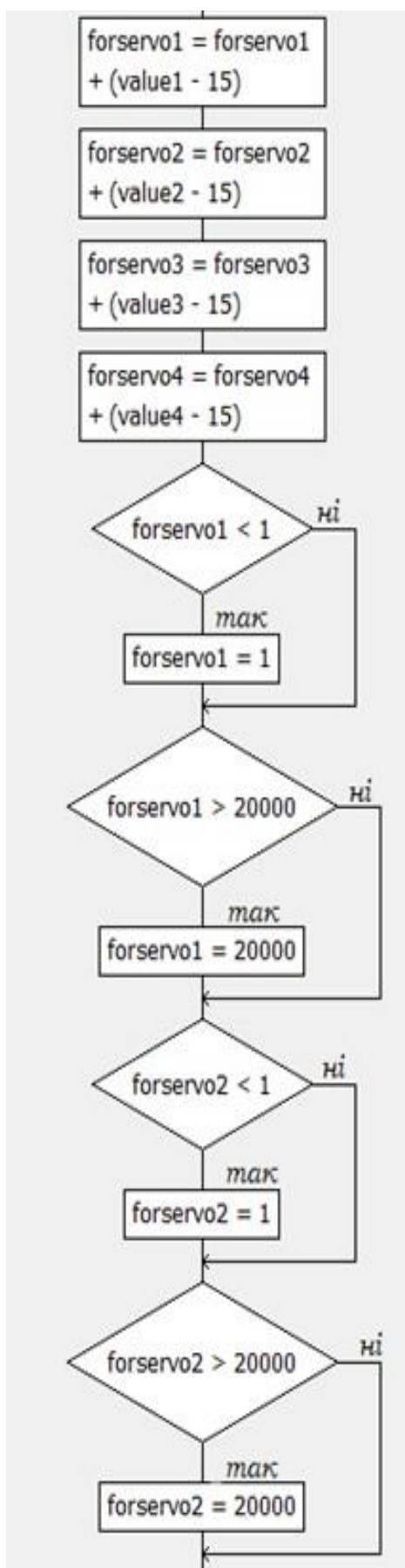


Рисунок 3.5 – Фрагмент алгоритму програми

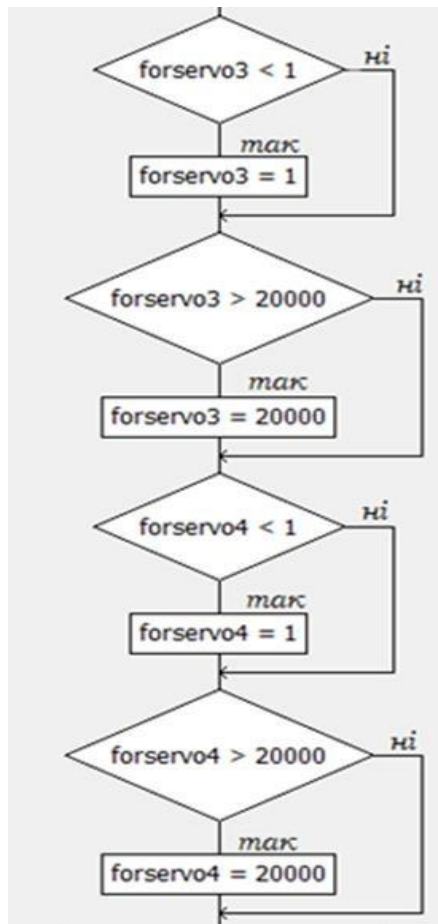


Рисунок 3.6 – Фрагмент алгоритму програми

У наступній частині блок схеми алгоритму роботи описується фінальний етап управління та перевірка роботи кнопки.

На рисунках 3.7 – 3.8 відбувається перетворення розрахункових значень у значення кутів для обертання сервоприводів, передачу цих сигналів та реакцію на натискання кнопки [11].

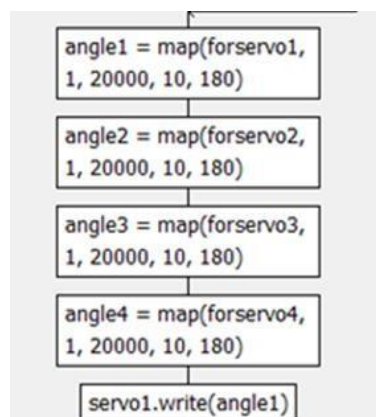


Рисунок 3.7 – Фрагмент алгоритму програми

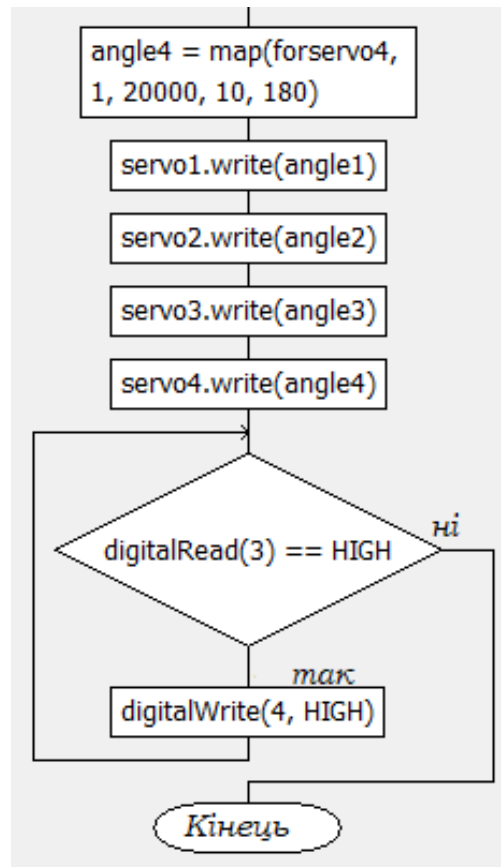


Рисунок 3.8 – Фрагмент алгоритму програми

### 3.4 Розробка коду роботи маніпулятора

Для розробки коду було обрано середовище розробки Arduino IDE. Це середовище досить просте в застосуванні, за рахунок простоти в налаштуванні, є можливість сфокусуватися саме на розробці та тестуванні, а не на складнощах в налаштуванні [17].

Спочатку необхідно підключити необхідні бібліотеки та створити об'єкти для керування.

```

#include <Servo.h>

Servo servo1;

Servo servo2;

Servo servo3;
  
```

```
Servo servo4;
```

Бібліотеки `Servo.h`, яка служить для керування сервоприводами через ШІМ-сигнали. Також створюється об'єкти класу `Servo` для керування чотирма моторами.

Наступним кроком буде оголошення пінів та змінних.

```
int pin0 = A0;
int pin1 = A1;
int pin2 = A2;
int pin3 = A3;
int angle1, angle2, angle3, angle4;
int value1, value2, value3, value4;
long int forservo1 = 20000;
long int forservo2 = 20000;
long int forservo3 = 20000;
long int forservo4 = 20000;
```

Змінні `pin0–pin3` відповідають за підключення потенціометрів (джойстиків). Змінні `value1–value4` – зчитання самих значень з джойстиків.

Змінні `angle1–4` – відповідають за кути повороту сервоприводів. Змінні `forservo1–4` – накопичувальні значення, що впливають на плавність.

Далі потрібно задати початкові налаштування в функції `void setup()`.

```
void setup()
{
  pinMode(3, INPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  servo1.attach(5);
```

```

servo2.attach(6);
servo3.attach(9);
servo4.attach(10);
}

```

Спочатку встановлюємо 3 пін як вхідний та 4 пін як вихідний. Після чого підключаємо сервоприводи до 5,6,9,10 піна відповідно.

Після чого ми звертаємося до функції `void loop()`. В цій функції задається логіка програми.

```

void loop()
{
    value1 = analogRead(pin0);
    value2 = analogRead(pin1);
    value3 = analogRead(pin2);
    value4 = analogRead(pin3);
}

```

Цей фрагмент зчитує 4 аналогові значення з джойстиків на пінових входах A0-A3 . Це необхідно для керування сервоприводами.

Далі провели масштабування значень

```

value1 = map(value1, 0, 1023, 1, 29);
value2 = map(value2, 0, 1023, 1, 29);
value3 = map(value3, 0, 1023, 1, 29);
value4 = map(value4, 0, 1023, 1, 29);

```

Це необхідно для того, щоб десятибітні значення перетворити на менший діапазон значень для простішого оброблення.

Задавання мертвої зони.

```

if(value1 <= 17 && value1 >= 13) value1 = 15;

```

```

if(value2 <= 17 && value2 >= 13) value2 = 15;
if(value3 <= 17 && value3 >= 13) value3 = 15;
if(value4 <= 17 && value4 >= 13) value4 = 15;

```

Необхідно для того, щоб незначні коливання джойстика ніяк не рухали сервоприводи.

Обмеження діапазону повороту.

```

if(forservo1 < 1) forservo1 = 1;
if(forservo1 > 20000) forservo1 = 20000;
if(forservo2 < 1) forservo2 = 1;
if(forservo2 > 20000) forservo2 = 20000;
if(forservo3 < 1) forservo3 = 1;
if(forservo3 > 20000) forservo3 = 20000;
if(forservo4 < 1) forservo4 = 1;
if(forservo4 > 20000) forservo4 = 20000;

```

Якщо значення змінної менше 1, то воно примусово встановлюється як 1. А якщо більше 2000, то його максимумов задається 2000. Це необхідно для нормалізації сигналів.

Перетворення змінної у відповідний кут повороту сервопривода.

```

angle1 = map(forservo1, 1, 20000, 10, 180);
angle2 = map(forservo2, 1, 20000, 10, 180);
angle3 = map(forservo3, 1, 20000, 10, 180);
angle4 = map(forservo4, 1, 20000, 10, 180);

```

Тут ми задали мінімальне та максимальне значення на вході та виході. Тобто перетворили значення з діапазону 1–20000, в діапазон 10–180, що вже є кутом повороту сервоприводу в градусах повороту.

Далі створили блок коду, який надсилає значення на кожний сервопривод для зміни його розположення.

```
servo1.write(angle1);  
servo2.write(angle2);  
servo3.write(angle3);  
servo4.write(angle4);
```

І останнім кроком було створення коду, що відповідає за реакцію на натискання джойстику.

```
while (digitalRead(3) == HIGH) {  
    digitalWrite(4, HIGH);  
}
```

Реалізація ефективного програмного коду забезпечує зчитування аналогових сигналів з чотирьох джойстиків, перетворення їх у значення кута, а також передавання відповідних команд керування сервоприводам.

Завдяки впровадженню мертвої зони, обмеження діапазону та поступової зміни положення, код гарантує стабільну, плавну та безпечну роботу маніпулятора.

### 3.5 Дослідження стійкості системи керування серводвигунами

Перетворимо П-регулятор у передавальну функцію

Для перетворення П-регулятора в передавальну функцію, його потрібно розглянути як дискретну систему автоматичного керування з накопичувальним ефектом [18].

Для кожного сервопривода використовується така формула оновлення кута:

$$\theta(t+1) = \theta(t) + K_p \cdot (e(t)/100),$$

де  $\theta(t)$  – кут сервопривода в нерухомому стані;

$e(t) = u(t) - CENTER$  – можливе відхилення джойстика,

$K_p = 0,2$  – ділення на 100 – масштабування для пом'якшення.

Застосуємо z-перетворення (припускаючи нульові початкові умови):

$$W(z) = \frac{Y(z)}{E(z)} = \frac{K_p}{1 - z^{-1}}$$

Приводимо вид до стандартної форми:

$$W(z) = \frac{K_p \cdot z}{z - 1}$$

Підставимо  $K_p$ :

$$W(z) = \frac{0,2 \cdot z}{z - 1}$$

Отримали:

$$W(z) = \frac{0,002 \cdot z}{z - 1}$$

Отже:

$$z - 1 = 0$$

$$z = 1$$

На рисунку 3.9 зображено графік стабільних діапазонів коефіцієнту стійкості системи.



Рисунок 3.9 – Графік стабільних діапазонів коефіцієнту стійкості системи.

Система приконтурно стійка, але не асимптотично стійка – її вихід може зростати до межі якщо помилка ненульова.

### 3.6 Розроблений макет

У ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було розроблено автоматизований механічний маніпулятор.

Було підібрано елементну базу, змодельовано маніпулятор в середовищі для розробки Tinkercad, створено структурну та принципову схему, в програмі Arduino IDE розроблено код для керування пристроєм, та проведено аналіз стійкості системи, з визначенням передавальної функції. Правильно підібрані елементи досить сильно спростили розробку маніпулятора.

На рисунку 3.10–3.11 зображено розроблений макет.

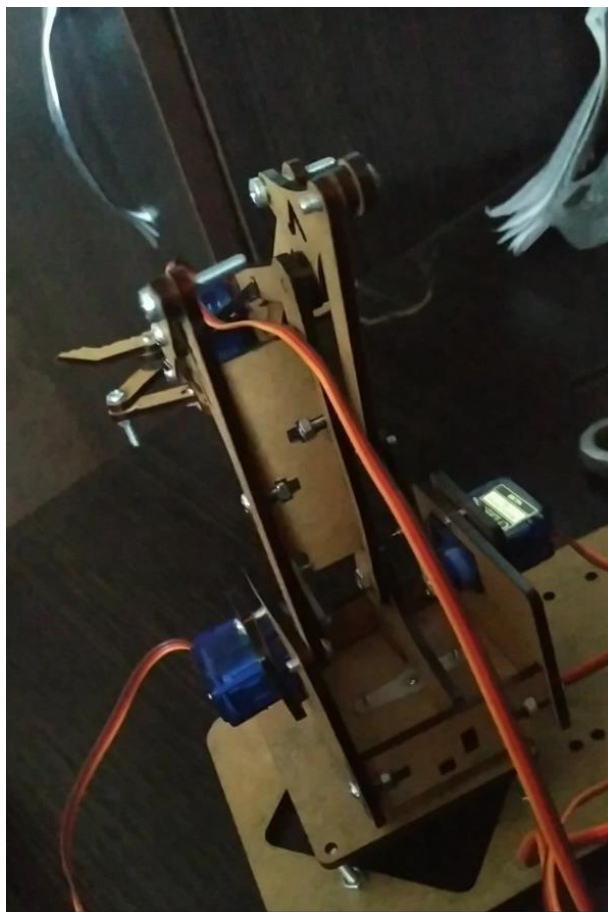


Рисунок 3.10 – Зображення макету маніпулятора

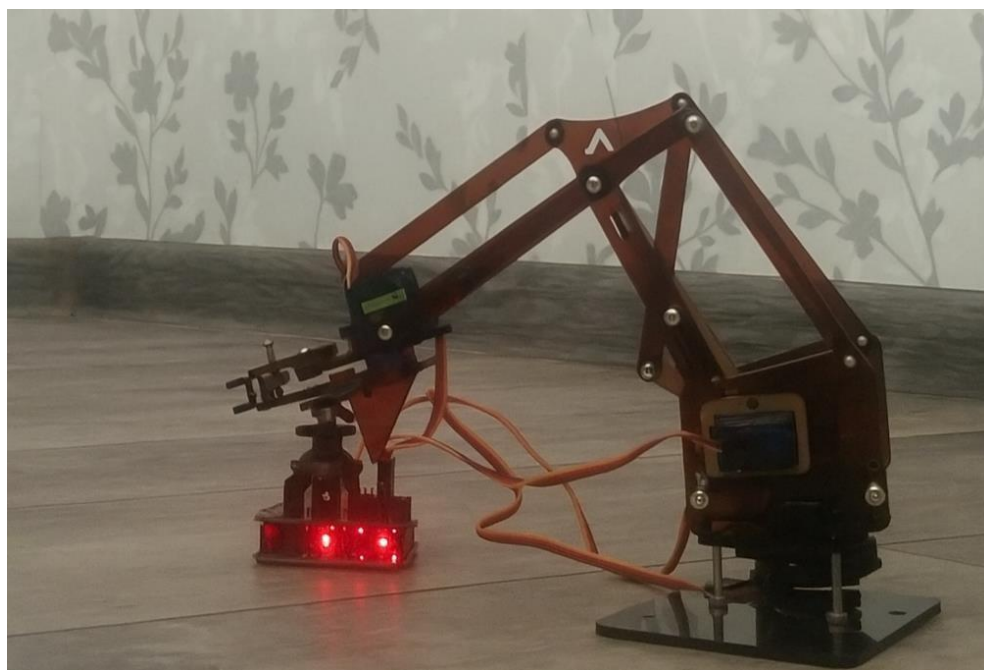


Рисунок 3.11 – Зображення макету маніпулятора

### 3.7 Охорона праці

Охорона праці є одним з найважливіших етапів при розробці та складанні автоматизованого маніпулятора, що працює в умовах потенційної небезпеки. Під час проектування маніпулятора необхідно враховувати вимоги чинного законодавства України у сфері охорони праці (Закон «Про охорону праці», ДСТУ, ПУЕ, ПТЄЕ та інші). Елементи для створення мають бути надійно закріплені, усі кабелі – ізольовані, а відкриті струмопровідні частини – недоступними для випадкового дотику. Також потрібно загострити увагу, на передбаченні захисту від перегріву та короткого замикання.

Додаткову небезпеку створюють серводвигуни, які можуть обертатися з великою швидкістю та силою. Тому необхідно бути уважним до цього питання, та не навантажувати надмірно серводвигуни [19].

Першочергово, потрібно організувати робоче місце відповідно до нормативних вимог. Поверхні повинні бути чистими, вільними від сторонніх предметів, які можуть викликати випадкове спрацювання обладнання або спровокувати травмування. Працювати з сервоприводами, блоками живлення і платами керування слід лише в умовах повної справності інструментів і належної вентиляції.

Для персоналу, що виконує монтаж, налагодження або обслуговування маніпулятора, обов'язковим є проходження первинного та повторного інструктажу з охорони праці. При роботі використовувати: гумові рукавички, захисні окуляри (при роботі з дрібними механізмами), спецодяг.

Особливу увагу потрібно приділити електробезпеці. Перед подачею живлення слід перевірити правильність з'єднання всіх компонентів: Arduino-контролера, сервоприводів, PWM-модуля, джерела живлення. Усі з'єднання мають бути ізольованими, заземлення виконано згідно ПУЕ. Виконуючи монтаж, потрібно впевнитися, що всі спеціальні інструменти справні, та є повноцінний захист від ударів струму [19].

У процесі тестування або демонстрації роботи маніпулятора необхідно використовувати захисні кожухи або обмежувачі ходу для запобігання раптовим рухам важелів, що можуть завдати удару оператору або пошкодити обладнання. Кнопка екстреного відключення живлення (типу № «STOP») має бути встановлена у легкодоступному місці для миттєвого реагування.

У приміщенні, де відбувається розробка та складання роботу повинні знаходитися наступні елементи першої допомоги розробнику:

- аптечка першої допомоги,
- справний вогнегасник,
- система аварійного освітлення,
- чіткий план евакуації.

На етапі експлуатації необхідно:

- уникати залишення пристрою увімкненим без нагляду,
- не допускати сторонніх осіб до робочої зони,
- застосовувати аварійне відключення у разі нестандартної поведінки системи [20].

Отже, дотримання вимог охорони праці при складанні та використанні автоматизованого маніпулятора забезпечує не лише захист персоналу, а й довговічність та надійність роботи технічного засобу. Відповідальний підхід до безпеки – це запорука стабільної роботи системи та зменшення виробничих ризиків.

У цьому розділі було розглянуто повноцінну розробку автоматизованого маніпулятора, створення структурної та принципової схеми, створення алгоритму роботи, написання програмного коду та дослідження стійкості керування системи. Також було приділено увагу охороні праці. Завдяки правильно підібраним елементам, вдалося створити достатньо ефективну та компактну модель робота.

За допомогою математичного моделювання було отримано передаточну функцію дискретної системи. Аналіз стійкості показав, що система працює на межі стійкості, але є стабільна [20].

## ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було успішно розроблено автоматизований механічний маніпулятор, який призначений для використання в умовах небезпечних виробничих процесів.

Основною задачею було створення пристрою, який забезпечить мінімізацію людського впливу, забезпечить безпеку та автономність.

Було підібрано елементну базу, змодельовано маніпулятор в середовищі для розробки Tinkercad, створено структурну та принципову схему, розроблено код для керування пристроєм, та проведено аналіз стійкості системи, з визначенням передавальної функції. Також було приділено увагу охороні праці: розглянуто правила роботи у виробничих умовах, запропоновані заходи для мінімізації травм при експлуатації обладнання.

Розроблений маніпулятор завдяки використанню доступних компонентів є досить бюджетним варіантом вирішення проблеми, але це не відмінняє можливості масштабного впровадження пристрою в промислові та дослідницькі сфери.

Таким чином розробка відповідає кільком цілям сталого розвитку: інноваційне виробництво, безпечні умови праці та підтримка технічної освіти.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Положення про протидію академічному плагіату в ХНУРЕ [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 31.12.2024 р. No 386. Режим доступу: [https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main\\_Docs\\_NURE/386\\_31.12.2024.pdf](https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main_Docs_NURE/386_31.12.2024.pdf) (дата звернення: 12.06.2025)
3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології освітньої [Електронний ресурс] / упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипченко, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О.В Сичова ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – електрон. вид. – Харків : ХНУРЕ,
4. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : Навчальний посібник / І. Невлюдов, О. Филипченко, О. Токарєва, С. Новоселов, О. Сичова. Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2023. – 151 с.
5. Цілі сталого розвитку [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf> (дата звернення: 14.06.2025).
6. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. :, 2022. – 427 с.
7. Що таке робот-маніпулятор? [Електронний ресурс] – режим доступу: <https://www.evsint.com/uk/what-is-a-robotic-manipulator-a-guide/> . (дата звернення: 18.06.2025).
8. Роботизовані маніпулятори [Електронний ресурс] – режим доступу: <Http://tst.stu.cn.ua/article/view/203785> (дата звернення: 18.06.2025).
9. Маніпулятори [Електронний ресурс] – режим доступу:

<https://wiki.factorio.com/Inserters/uk>. (дата звернення: 19.06.2025).

10. Невлюдов І. Ш. Механізми технічних засобів автоматизації. Довідкові матеріали з курсового і дипломного проектування: навч. посібник / І. Ш. Невлюдов, В. І. Роменський, І. О. Яшков; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 292 с. – ISBN ISBN 978-966-659-301-9.

11. Невлюдов І. Ш. Комп'ютерно-інтегровані технології виробництва технічних засобів автоматизації. Частина 2: Підручник Кривий Ріг: видавець Чернявський Д. О., 2022. 424 с.

12. Дослідження структурних схем мехатронних маніпуляторів [Електронний ресурс]Режим доступу:

[https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/25996/1/MSIE\\_2023\\_P097-098.pdf](https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/25996/1/MSIE_2023_P097-098.pdf)  
(дата звернення: 20.06.2025).

13. Система керування роботом-маніпулятором [Електронний ресурс] Режим доступу: Науковий журнал "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво" Луцьк, 2020. Випуск № 40

14. Arduino сайт. - URL: <https://www.arduino.com> (дата звернення: 12.04.2024) . (дата звернення: 22.06.2025).

15 Будова та принцип роботи сервоприводу. - URL: <https://radiomodel.in.ua/budova-ta-printsip-roboti-servoprivodu/> . (дата звернення: 23.06.2025).

16 Середовище розробки <https://www.tinkercad.com/dashboard>. (дата звернення: 24.06.2025).

17. Програмування ардуїно. - URL: <https://doc.arduino.ua/ua/prog/>. (дата звернення: 19.06.2025).

18. Теорія автоматичного управління (збірник задач): навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарева. Харків: ХНУРЕ, 2020. 240 с. 35. . (дата звернення: 19.06.2025).

19 . Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» у випускних роботах ОКР «бакалавр» усіх форм навчання [Текст] / уклад. Б. В. Дзюнзюк, В. А. Айвазов, Т. Є. Стиценко. – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 28 с

20. «Безпека праці в індустрії ІТ-технологій» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [<http://catalogue.nure.ua/knmz>] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 122 с