

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Галина БОГДАН

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

**на тему: «Автоматизована система керування маніпулятором
промислового робота»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПК-11

Жидик Євгеній Васильович _____

Керівник:

доцент, к.т.н.,

Галаган Роман Михайлович _____

Рецензент:

доцент, к.т.н.,

Синиця Валентин Іванович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизована система керування
маніпулятором промислового робота»**

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Галина БОГДАН

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Жидику Євгенію Васильовичу

1. Тема проєкту «Автоматизована система керування маніпулятором промислового робота», керівник проєкту Галаган Роман Махайлович, доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. № 1765
2. Термін подання студентом проєкту 9 червня 2025 року.
3. Вихідні дані до проєкту : Чотирьохосьова система руху руки-маніпулятора з механізмом захоплення на кінці, що керується зменшеною копією руки-маніпулятора.
4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1. Аналітичний огляд; Розділ 2. Розробка системи; Розділ 3. Розрахунки; Розділ 4. Проєктування електричної принципової схеми і програмного алгоритму та друк комплектуючих.
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема електрична принципова підключення усіх

компонентів, схема електрична принципова плати мікроконтролера, схема електрична принципова плати керування сервоприводами, алгоритм роботи програми руки-маніпулятора, структурна схема, презентація доповіді.

6. Консультанти розділів проєкту

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

7. Дата видачі завдання 18 березня 2025 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналітичний огляд	05.05.2025	
2	Автоматизація системи	10.05.2025	
3	Підбір елементної бази	12.05.2025	
4	Розробка 3D-моделі корпусу руки-маніпулятора та зменшеної копії	15.05.2025	
5	Розробка програмного забезпечення	20.05.2025	
6	Виготовлення компонентів руки-маніпулятора та її зменшеної копії	25.05.2025	
7	Тестування системи	27.05.2025	
8	Формування загальних висновків та оформлення дипломного проєкту	01.06.2025	

Студент

Євгеній ЖИДИК

Керівник

Роман ГАЛАГАН

АНОТАЦІЯ

Метою даного дипломного проєкту є розробка автоматизованої системи керування маніпулятором промислового робота, що складається із двох взаємодоповнюючих пристроїв – зменшеної «керуючої» руки, рухи якої зчитуються потенціометрами, та повнорозмірної «виконавчої» руки, яка відтворює ці рухи в реальному часі під керуванням мікроконтролера Arduino Leonardo і 16-канального ШІМ-контролера PCA9685 для серводвигунів MG995, DS3218 та SG90. Система забезпечує точне позиціонування, має запас крутного моменту $\sim 43\%$ на критичних осях та відображає стан виконавчих механізмів на індикаторі LED.

У межах роботи проаналізовано світовий ринок колаборативних роботів, сформульовано технічне завдання, обґрунтовано вибір елементної бази, виконано розрахунки енергоспоживання, точності й динаміки відгуку, а також визначено необхідний крутний момент приводу бази. Розроблено електричну принципову схему, алгоритм програмного забезпечення, 3D-модель деталей у Fusion 360 та здійснено FDM-друк прототипу з PETG/PLA із доббором параметрів друку й підтримок.

Робота викладена на 59 сторінках (без додатків), містить 4 розділи, 25 рисунків, 2 таблиці, 5 додатків та 31 літературне джерело. У результаті одержано повністю працездатний макет маніпулятора, що підтверджує ефективність запропонованої архітектури та відкриває перспективи подальшої модернізації до рівня колаборативного робота, орієнтованого на потреби малого й середнього бізнесу.

Ключові слова: автоматизована система, промисловий робот-маніпулятор, Arduino Leonardo, PCA9685, серводвигун, 3D-друк, PETG, PLA, крутний момент, енергоспоживання.

ABSTRACT

The objective of this diploma project is to develop an automated control system for an industrial robotic manipulator, consisting of two complementary components: a scaled-down “master” arm, whose movements are captured by potentiometers, and a full-sized “slave” arm that replicates these movements in real time, controlled by an Arduino Leonardo microcontroller and a 16-channel PWM controller (PCA9685) driving MG995, DS3218, and SG90 servo motors. The system ensures precise positioning, maintains a torque reserve of approximately 43% on critical axes, and displays the actuator status on an LED indicator.

The project includes an analysis of the global collaborative robotics market, formulation of the technical requirements, justification for the selected hardware components, as well as calculations of power consumption, response accuracy and dynamics, and the required torque for the base drive. The work also comprises the development of an electrical schematic, software algorithm, 3D modeling of parts in Fusion 360, and fabrication of a working prototype using FDM 3D printing with PETG/PLA, including optimization of print settings and support structures.

The thesis is presented on 59 pages (excluding appendices), contains 4 chapters, 25 figures, 2 tables, 5 appendices, and references 31 literary sources. As a result, a fully functional manipulator prototype was developed, confirming the effectiveness of the proposed architecture and laying the foundation for further modernization toward a collaborative robotic system tailored to the needs of small and medium-sized enterprises.

Keywords: automated system, industrial robotic manipulator, Arduino Leonardo, PCA9685, servo motor, 3D printing, PETG, PLA, torque, power consumption.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	10
1.1. Актуальність теми дослідження	10
1.2. Огляд існуючих рішень.....	16
1.2.1. Universal Robots UR12e	17
1.2.2. FANUC CRX-10iA/L	18
1.2.3. Techman TM12S	19
1.2.4. ABB GoFa™ CRB 15000 (10kg)	20
1.2.5. KUKA LBR iiwa 14 R820	21
1.2.6. AUBO-i10	22
1.2.7. Doosan M1013	23
1.3. Постановка технічного завдання	25
1.3.1. Основні характеристики та принципи роботи	25
Висновок до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ	28
2.1. Автоматизація системи.....	28
2.1.1. Опис в загальному вигляді природи технологічного об'єкту та процесів, що протікають в ньому	28
2.1.2. Визначення та опис регульованих параметрів, збурень і можливих дій керування	29
2.1.3. Складання параметричної схеми ОК	29
2.1.4. Структурна схема	31
2.2. Підбір елементної бази.....	32
2.2.1. Підбір мікроконтролера.....	32

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизована система керування маніпулятором промислового робота			Літера	Аркуш	Аркушів		
Розроб.		Жидик Є.В.										
Перевір.										5	62	
Реценз.								ПБФ, ПК11				
Н. Контр.												
Затверд.		Галаган Р.М.										

2.2.2. Підбір модуля управління сервоприводами	32
2.2.3. Підбір сервоприводу для керування клешнею	34
2.2.4. Підбір сервоприводів для функціонування керувальної руки робота-маніпулятора	35
2.2.5. Підбір блока живлення	37
Висновки до розділу 2	38
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ	39
3.1. Розрахунок енергоспоживання робота-маніпулятора	49
3.2. Розрахунок точності відтворення та відгуку системи	41
3.3. Розрахунок необхідного крутного моменту на поворотний механізм бази руки-маніпулятора	42
Висновки до розділу 3	43
РОЗДІЛ 4. ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ І ПРОГРАМНОГО АЛГОРИТМУ ТА ДРУК КОМПЛЕКТУЮЧИХ	45
4.1. Розробка 3D моделі	45
4.1.1. Вибір 3D-моделі для проєкту	45
4.1.2. Вибір середовища розробки для підготовки 3D моделі	45
4.1.3. Підбір слайсера для підготовки 3D моделі до друку	46
4.1.4. Вибір матеріалу для друку	48
4.1.5. Підбір параметрів для друку	50
4.2. Розробка електричної принципової схеми	52
4.2.1. Сервоприводи Tower Pro SG90 та MG995 а також DSSERVO DS3218MG.	52
4.2.2. Плата керування сервоприводами Adafruit PCA9685	53
4.2.3. Мікроконтролер Arduino Leonardo	53
4.2.4. Потенціометри B10K	53
4.2.5. Кнопка DIP 6x6x5мм	53
4.2.6. Індикаторний світлодіод	54
4.3. Розробка алгоритму програмного забезпечення	54

4.3.1. Ініціалізація.....	54
4.3.2. Основний цикл керування	55
4.3.3. Реалізація функції плавного переміщення	56
Висновок до розділу 4	57
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

СКОРОЧЕННЯ ТА РОЗ'ЯСНЕННЯ ТЕРМІНІВ

- САПР – система автоматизованого проєктування та розрахунків.
- Ізольований промислових робот маніпулятор* – у випадку використання загорожі або обмежених зон для персоналу.
- Колаборативний робот* або кобот — у випадку наявності сертифікації про безпечну роботу поруч з людиною.
- Телероботи — дистанційно керовані роботи.
- РК – рідко-кристалічний дисплей.
- CAGR (Compound Annual Growth Rate) — середньорічний темп зростання.
- AI (Artificial Intelligence) — штучний інтелект.
- SDK (Software Development Kit) — набір інструментів для розробника.
- API (Application Programming Interface) — програмний інтерфейс прикладного програмування.
- PLA (Polylactic Acid) — полілактид.
- SRAM (Static Random-Access Memory) — статична оперативна пам'ять.
- EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) — електрично стирається програмована постійна пам'ять.
- FDM (Fused Deposition Modeling) — моделювання методом наплавлення шарів.
- G-код — це набір текстових команд, які описують послідовність дій для 3D-принтера, включаючи в себе таку інформацію як: переміщення, швидкість, температуру, подачу матеріалу та інші параметри для друку.
- ШІМ — широтно-імпульсна модуляція.

*У документі ДСТУ EN ISO 10218-1:2018 промислові роботи, згідно з вимогами до безпеки, розділяються на такі два підтипи.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

ВСТУП

Впровадження та розвиток автоматизації у виробничих процесах є невід’ємною частиною ефективного функціонування підприємств. Постійно зростаюча потреба у підвищенні продуктивності і зменшенні залучення людського ресурсу і як наслідок зниженні витрат і забезпеченні стабільності у якості продукції стимулює до інтеграції нових або покращення технологій автоматизації. Одним із рішень для вирішення цієї проблеми є застосування промислових роботів, зокрема маніпуляторів, що здатні виконувати широкий спектр задач з високою точністю.

Маніпулятор — це виконавчий механізм, що відтворює рухи, подібні до руки людини, і здатен точно позиціонувати об’єкти у тривимірному просторі. У промисловості такі пристрої використовуються для транспортування, збирання, обслуговування обладнання та виконання технологічних операцій. Вони особливо актуальні в умовах серійного або повторюваного виробництва.

Метою даної дипломної роботи є розробка автоматизованої системи керування, що надала б змогу забезпечити точну, надійну а також ефективну роботу виконавчого механізму. Впродовж виконання буде проведено дослідження ринку промислових роботів та актуальності їхнього використання у сучасних умовах а також будуть використані набуті раніше навички, такі як: створення і проектування структурних та електричних схем, розробка програмного забезпечення та програмування мікроконтролерів а також використання системи автоматизованого проектування САПР Fusion 360 подібної до SolidWorks.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Актуальність теми дослідження

У сучасних економічних та геополітичних умовах, питання технічної незалежності та промислової самозабезпеченості місцевих бізнесів, які повинні мати змогу швидко та гнучко адаптуватися до нових викликів, починає відігравати особливо важливу роль, враховуючи надважливі фактори з якими стикаються більшість підприємств.

З приходом нової адміністрації США на чолі з Дональдом Трампом із ідеєю політики захисту внутрішнього виробка на ринку США, почалося впровадження негайних підвищених мит на імпортні товари. Наслідком таких дій став розподіл світової економіки. Це створило ризики переривання глобальних ланцюгів постачання, що утворювалися протягом десяти років. Це є особливою проблемою для великих гравців ринку, оскільки постає необхідність у переносі виробництва в інші країни та будівництва нових масштабних заводів з виробництва з використанням великих ізольованих промислових роботів-маніпуляторів (Рис. 1.1.), що використовуються для крупно-вузлової збірки та налаштування автоматичної роботи стрічки конвеєра або виробничої лінії.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10



Рис. 1.1. Ізольований робот-маніпулятор на стрічці конвеєра [1].

Цей час грає на користь малих та середніх бізнесів для яких з'являється вікно можливостей для зайняття частини ринку. Оскільки, як було згадано раніше, ізольовані промислові роботи-маніпулятори потребують скрупульозного налаштування, мають потребу у великих економічних ресурсах та значній обмеженості у взаємодії з людиною, то при дрібносерійному виробництві або при роботі в якості малосерійного підрядника для інших компаній, найчастіше використовується жива робоча сила і також на допомогу працівникам приходять коботи (Рис. 1.2.).

Вони мають перевагу саме в тих аспектах в яких великі ізольовані промислові роботи-маніпулятори проявляють свої недоліки а саме:

- Є набагато безпечнішими і надають можливість працювати пліч-о-пліч з людиною без необхідності впровадження додаткових заходів безпеки та фізичних бар'єрів, завдяки вбудованим сенсорам та системам контролю сили і крутного моменту.
- Можуть легко бути переміщені для виконання нових задач на підприємстві.

- Менш вибагливі до кваліфікації робочого персоналу. Можуть легко програмуватися та гнучко налаштовуватися простою демонстрацією рухів від людини, після чого робот може їх відтворювати.
- Є набагато простішими у встановленні через менші розміри та вагу.



Рис. 1.2. Кобот та його взаємодія з людиною [2].

Також потрібно пам'ятати і про локальні проблеми з якими напряду стикнулася Україна. Повномасштабне вторгнення Росії в Україну завдало значної шкоди інфраструктурі України а й змусило змінити стратегічний підхід до оборонних підприємств. Великі наземні цехи та склади під відкритим небом вже не можна використовувати через постійні загрози обстрілів і знищення таких об'єктів. Тому розгалуження великих заводів на менші підприємства є як ніколи доцільним. Також через обмеження постачання озброєння від країн партнерів та їхню нестабільність постає гостра необхідність у розгортанні власного оборонно-промислового виробництва, зокрема на базі малих

інноваційних підприємств. В цих складних умовах коботи можуть вирішити кілька проблем внаслідок зменшення кількості робочого персоналу, а саме:

- Можливість налагодити роботу за умови дефіциту кадрів внаслідок мобілізації та трудової міграції.
- Зменшення ризиків втрати цінного персоналу.
- Пришвидшення збірки компонентів озброєння.

Таким чином, коли глобальні ринки стають менш доступними а безпека держави та людей на пряму залежить від здатності самостійно забезпечувати свої оборонні та економічні потреби, коботи відкривають нові можливості та стають необхідністю. А для малого та середнього бізнесу це шанс не лише вистояти в умовах глобальних криз але й стати основою нової, децентралізованої промисловості України.

Що ж до незалежних досліджень світового ринку дистанційних маніпуляторів, то згідно з дослідженням ABI Research (2024), коботи не лише стрімко впроваджуються на виробництві, а й вважаються основою нової парадигми, що змінює підхід до автоматизації. Хоча нинішні технології мають певні обмеження, переваги більш гнучкої та менш дорогої роботизованої руки промислового класу створюють чудову альтернативу для виробників, яким складно інвестувати великі кошти в комплексну автоматизацію. Попри те, що незалежні виробники коботів активно розвиваються, основні гравці ринку промислових роботів ще не скористалися цією можливістю повною мірою — їхні рішення з коботами або надто дорогі, або надто складні в експлуатації для масового впровадження.

ABI Research прогнозує, що до 2027 року обсяг ринку колаборативних роботизованих рук досягне 5,8 мільярда доларів США на рік, з яких 2 мільярди припадуть на виробництво автомобілів та автозапчастин. Додатковими джерелами прибутку стануть програмне забезпечення та пристрої на кінці маніпулятора (EOAT). ABI Research також відзначає, що колаборативні системи поступово стануть практично не відрізнити від звичайних

промислових роботів, що потенційно відкриває ринок для набагато вищої оцінки [3].

А минулорічне дослідження проведене командою WiseGuyReports стверджує, що глобальний ринок дистанційних маніпуляторів, до якого належать і телероботи, і коботи з елементами дистанційного керування, зросте з \$14,26 млрд у 2023 році до \$21 млрд до 2032 року.

Нижче наведено графік, що показує лінійну характеристику зростання ринку дистанційних маніпуляторів з показником середнього темпу зростання у 4,4% щорічно (Рис 1.3.).



Рис. 1.3. Графік середньорічного темпу зростання (CAGR) ринку дистанційних маніпуляторів [4].

Цей темп обумовлений зростаючим попитом на автоматизацію в небезпечних середовищах — таких як атомна енергетика, хімічна промисловість та в особливості оборонна сфера, яка є надзвичайно актуальною на ринку України на найближчі десятки років [5].

Також нижче представлений графік розподілу ринку дистанційних маніпуляторів станом на 2024 рік та прогнозу на 2032 (Рис. 1.4), з якого видно, що всі ринки мають відповідне і пропорційне зростання, що в свою чергу надає впевненості в майбутньому сталому та прогнозованому ринку незалежно від регіону.

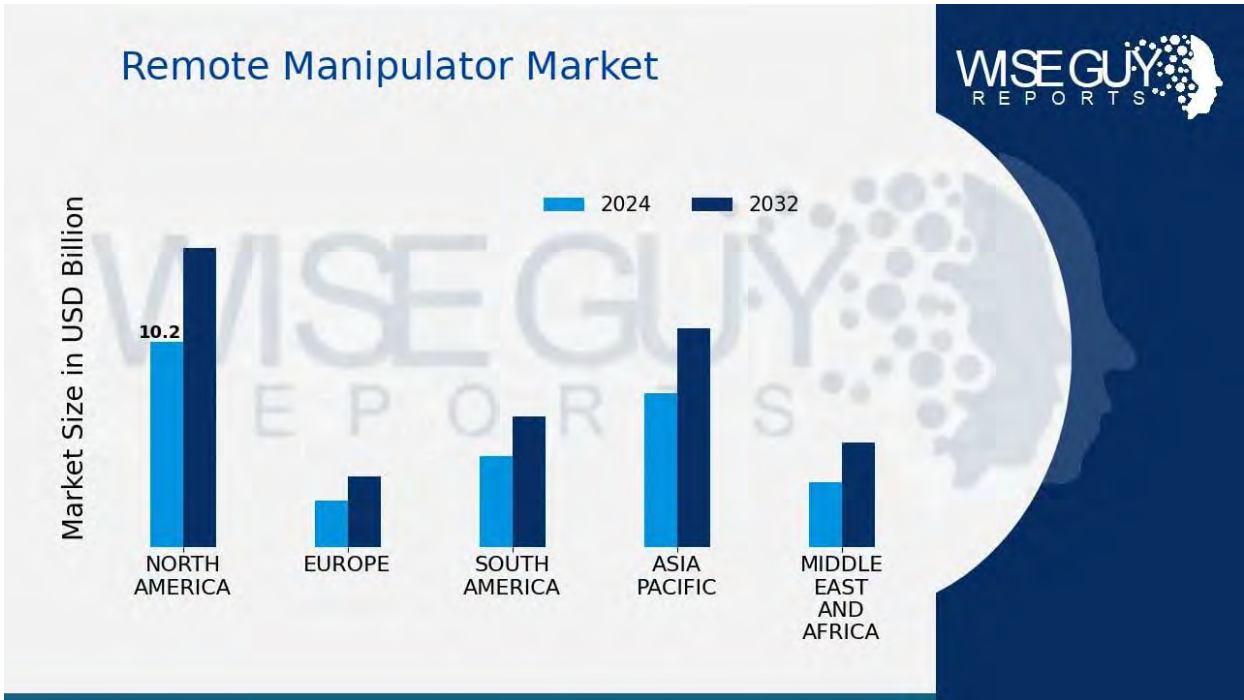


Рис. 1.4. Графік розподілу ринку дистанційних маніпуляторів за ключовими регіонами [6].

Тож на сьогодні коботи та віддалені маніпулятори — це не просто тренд, а відповідь на конкретні потреби промисловості: скорочення витрат, зменшення ризиків для персоналу та підвищення ефективності виробничих процесів у складних і небезпечних умовах. Особливо це є важливим для українського малого та середнього бізнесу, який змушений вести свою діяльність в умовах воєнного стану, обмеженого доступу до імпортного обладнання та потреби в технологічній незалежності.

1.2. Огляд існуючих рішень

Наразі на ринку доступний досить широкий спектр моделей коботів та готових рішень, пропонуючи підприємствам обширний вибір під різні задачі та бюджети починаючи від дрібносерійного виробництва до високоточних дій у різних сферах та галузях. Нижче показано дослідження ринку коботів у 2022 від аналітичної онлайн-платформи Statzon [29].

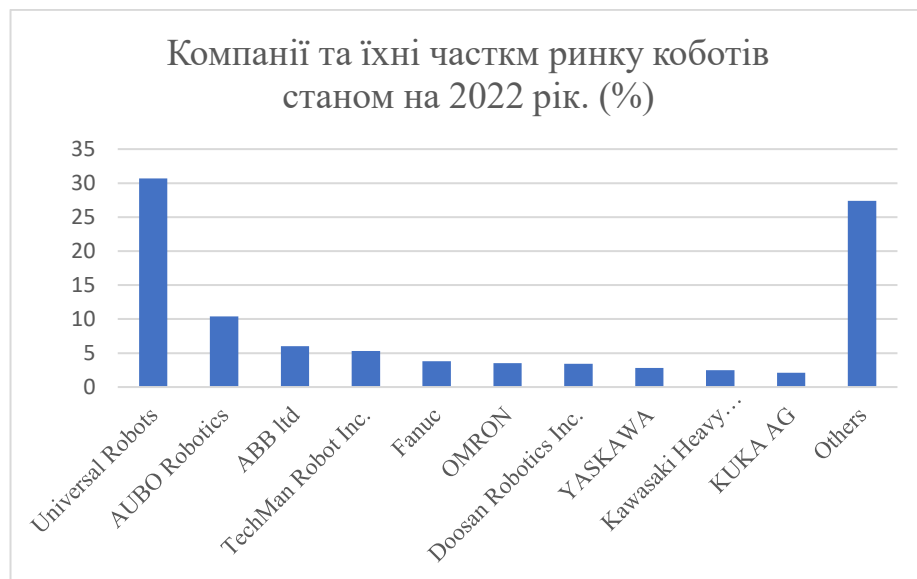


Рис.1.5. Графік розподілу ринку коботів станом на 2022рік [29].

Нижче буде здійснено порівняльний аналіз семи популярних моделей коботів за такими критеріями:

- Ціна (з врахуванням оптових закупівель).
- Радіус дії (робочий простір кобота).
- Споживання, Вт (середнє та пікове для оцінки енергоефективності).
- Вантажопідйомність (за цільове робоче навантаження буде взято вантаж масою до 10кг).
- Переваги та недоліки кожної моделі (включаючи практичні аспекти впровадження).

1.2.1. Universal Robots UR12e

Кобот UR12e (Рис1.6.) поєднує в собі високу точність та енергоефективність і підходить для таких завдань, як: прецизійне складання, точна обробка та контролю якості [7].



Рис.1.6. Кобот UR12e та оператор з пультом керування [8].

Загальні характеристики:

- Ціна – 25500 - 28250\$
- Радіус дії – 1300мм.
- Споживання (середнє/пікове) – 360/615.
- Вантажопідйомність 12.5кг.

Переваги:

- Висока точність.
- Енергоефективність.
- Досить широкий спектр вибору за корисним навантаженням до 16кг.
- Простота програмування та налаштування.

Недоліки:

- Вища ціна порівняно з аналогами.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.2.2. FANUC CRX-10iA/L

Кобот CRX-10iA/L (Рис. 1.7.) — це легкий і надійний варіант для підприємств, які тільки починають автоматизацію. Завдяки простому програмуванню і низьким вимогам до обслуговування він добре підходить для логістики, пакування, простого складання [9].



Рис.1.7. Кобот CRX-10iA/L та пульт керування [10].

Загальні характеристики:

- Ціна – 22000 - 30000\$.
- Радіус дії – 1418мм.
- Споживання (середнє/пікове) – 300/ - .
- Вантажопідйомність 10кг.

Переваги:

- Простота програмування та навчання.
- Бренд орієнтований і на український ринок.
- Великий радіус дії.

Недоліки:

- Можливі обмеження по складним задачам.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

1.2.3. Techman TM12S

Кобот TM12S (Рис. 1.8.) — це високоточна модель із вбудованим зоровим модулем і підтримкою AI, що робить її ідеальною для задач, пов'язаних із високоточним складанням, зварюванням, тестуванням та обробкою електроніки [11].



Рис.1.8. Кобот TM12S на виробництві виконує полірувальні роботи [12].

Загальні характеристики:

- Ціна – ~34000\$.
- Радіус дії – 1300мм.
- Споживання (середнє/пікове) – 300/ - .
- Вантажопідйомність 12кг.

Переваги:

- Надвисока точність у 0.03мм.
- Вбудоване машинне бачення та підтримка AI.
- Сертифіковані функції безпеки.

Недоліки:

- Досить висока ціна.
- Обмеження SDK для сторонньої інтеграції.

1.2.4. ABB GoFa™ CRB 15000 (10kg)

GoFa CRB 15000 модифікації для навантаження до 10кг (Рис. 1.9.) — швидкий і компактний кобот від ABB, орієнтований на виконання динамічних задач із коротким циклом, таких як пакування, маркування, обробка [13].

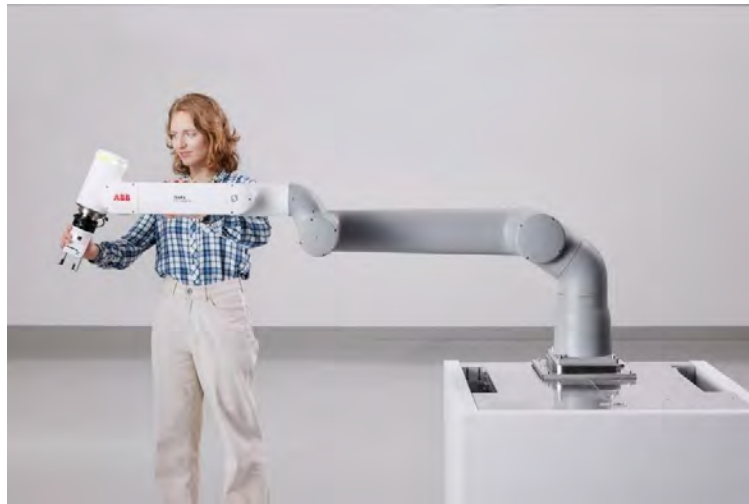


Рис.1.9. GoFa CRB 15000 в процесі демонстрації [13].

Загальні характеристики:

- Ціна – 17000 - 50000\$.
- Радіус дії – 1620мм.
- Споживання (середнє/пікове) – 250/ - .
- Вантажопідйомність 10кг.

Переваги:

- Висока швидкість до 2.2 м/с.
- Найвища точність на ринку у 0.02мм.
- Хороша ціна при купівлі великої партії.
- Найбільший радіус для моделей такої вантажопідйомності.

Недоліки:

- Дуже висока ціна у випадку по-штучного придбання.
- Відносно нова модель на ринку.

1.2.5. KUKA LBR iiwa 14 R820

Кобот LBR iiwa 14 R820 (Рис. 1.10.) — це преміальна модель із 7 ступенями свободи та високою сенсорною чутливістю. Використовується для прецизійного маніпулювання, зокрема в медичних, електронних і складальних галузях [14].



Рис.1.10. LBR iiwa 14 R820 на виробництві електроніки [15].

Загальні характеристики:

- Ціна – 25000 - 30000\$.
- Радіус дії – 820мм.
- Споживання (середнє/пікове) – 500/1000.
- Вантажопідйомність 14кг.

Переваги:

- 7 поворотних осей, що забезпечує велику гнучкість налаштуванню.
- Висока чутливість до сили.
- Можливість використовувати у медичній сфері.

Недоліки:

- Складне налаштування відносно конкурентів.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

1.2.6. AUBO-i10

AUBO-i10 (Рис. 1.11.) — бюджетна, але функціональна модель для малого та середнього бізнесу. Підходить для обробки, упаковки, простого складання [16].



Рис.1.11. AUBO-i10 на виробництві, тримає електричний пістолет для нанесення клею або герметика [16].

Загальні характеристики:

- Ціна – 3000 - 15000\$.
- Радіус дії – 1350мм.
- Споживання (середнє/пікове) – 500/2000.
- Вантажопідйомність 10кг.

Переваги:

- Низька ціна, особливо при великій оптовій закупівлі.
- Відкритий API для розробників.
- Модульна конструкція.

Недоліки:

- Китайський бренд не має розвиненої підтримки у США та Європі.
- Високе пікове споживання.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

1.2.7. Doosan M1013

Кобот M1013 (Рис. 1.12.) — потужна модель для промислових умов із високою жорсткістю, ідеально підходить для металообробки, логістики, переміщення важких деталей [17].

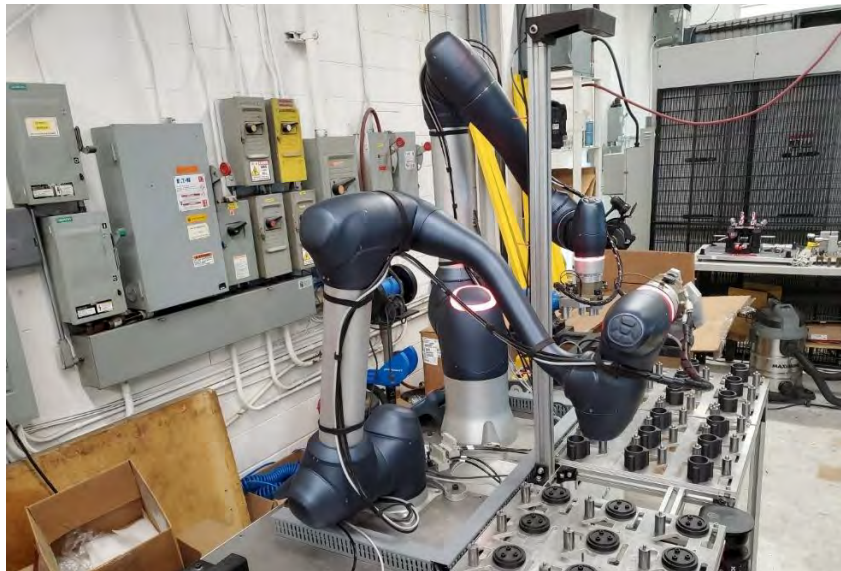


Рис.1.12. Doosan M1013 на виробництві [18].

Загальні характеристики:

- Ціна – 35000 - 40000\$.
- Радіус дії – 1300мм.
- Споживання (середнє/пікове) – 500/ - .
- Вантажопідйомність 10кг.

Переваги:

- Висока стабільність та надійність.
- Досить хороша точність у 0.05мм.
- Має хороше оснащення по датчикам безпеки.

Недоліки:

- Доволі крупний як для кобота такої вантажопідйомності.
- Має високу ціну.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Порівняльна таблиця 1.1. демонструє, що кожна модель кобота має свої сильні сторони: одні вирізняються точністю, як наприклад: ABB GoFa, Techman TM12S, інші - радіусом дії або ціною, серед них: AUBO-i10, FANUC CRX-10iA/L.

Таблиця 1.1.

Порівняльна таблиця коботів за деякими параметрами				
Назва моделі	Ціна, \$	Радіус дії, мм	Переваги	Недоліки
Universal Robots UR12e	25500 - 28250	1300	Висока точність; енергоефективність; гнучкий вибір; простота програмування.	Вища ціна; обмеження по навантаженню до 16 кг.
FANUC CRX-10iA/L	22000 - 30000	1418	Просте навчання; японська якість; локалізація; великий радіус.	Можливі обмеження по складним задачам.
Techman TM12S	~34000	1300	0.03 мм точність; машинне бачення; AI; безпека.	Висока ціна; обмеження SDK.
ABB GoFa™ CRB 15000 (10kg)	17000 - 50000	1620	2.2 м/с швидкість; 0.02 мм точність; вигідна при партіях; найбільший радіус.	Висока ціна поштучно; новинка ринку.
KUKA LBR iiwa 14 R820	25000 - 30000	820	7 осей; чутливість до сили; придатний для точних робіт.	Складне налаштування.

Продовження таблиці 1.1.

AUBO-i10	3000 - 15000	1350	Низька ціна; відкритий API; модульність.	Слабка підтримка в ЄС/США; висока пікова потужність.
Doosan M1013	35000 - 40000	1300	Стабільність; точність 0.05 мм; датчики безпеки.	Габарити; висока ціна.

Ідеального рішення для здійснення усіх задач не існує - вибір залежить від потреб виробництва, бюджету, вимог до точності, гнучкості, габаритів та сфери застосування. Також важливо враховувати компроміс між функціональністю, вартістю та підтримкою.

Саме тому ключовим фактором є не максимальні характеристики, а баланс баланс цих характеристик та відповідність конкретного робота до завдання підприємств, рівню автоматизації та очікуваним навантаженням.

1.3. Постановка технічного завдання

На основі проведеного аналізу актуальності промислових роботів , а саме підтипу – коботів, головною метою проєкту стає розроблення автоматизованої системи управління промислового робота, в даному випадку – кобота, для використання у сфері малого та середнього бізнесу.

1.3.1. Основні характеристики та принципи роботи

Опис конструкції:

- Виконавча рука-маніпулятор:
 - Повнорозмірна рука-маніпулятор, що розміщена на основі.

- В основі шарнірів лежать сервоприводи.
- Захопленням об'єктів займається клешня.
- Всередині основи знаходяться основні елементи, такі як: плата мікроконтролера та плата підключення сервоприводів.
- Ручна рука-маніпулятор, що керується людиною:
 - Зменшена рука-маніпулятор, що стоїть на компактній основі.
 - Основою шарнірів виступають енкодери.
 - На краю розміщена кнопка, що при затисканні роз'єднує клешні великої руки.

Людина рухає зменшену (ручну) руки-маніпулятор, в цей же час виконавча рука-маніпулятор в точності відтворює рухи зменшеної копії. При затисканні кнопки на краю ручної руки-маніпулятора, клешні повнорозмірної руки будуть розкриватися, тоді клешню можна підвести до об'єкту і вже після відпускання кнопки клешні зажмуть об'єкт, тоді чого його можна буде перемістити.

Корпусні частини будуть виконані за допомогою 3D друку з використанням PLA та PETG пластику, також у конструкції клешні буде використано гумові резинки.

Висновок до розділу 1

У даному розділі було комплексно досліджено актуальність застосування промислових роботів на основі сучасних реалій, серед яких: глобальні зміни в світовій економіці, внаслідок ізоляції найбільшого ринку промислових роботів-маніпуляторів а також реалії внутрішнього ринку через повномасштабне вторгнення Росії на територію України, що змусило шукати

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

нових підхід до створення підприємств, на допомогу у чому і приходять колаборативні роботи.

Виконаний аналіз незалежних досліджень також показав, що ринок цієї сфери не планує зупинятись і матиме хоч і не стрімкий, проте, стабільний ріст протягом наступних років.

Також було досліджено світовий ринок коботів, внаслідок якого було дійдено до висновку, що усі коботи мають свої переваги й недоліки - універсального рішення не існує. Вибір моделі залежить від конкретних потреб виробництва, бюджету та завдань. Головне - підібрати кобота, що найкраще відповідає вашим умовам, а не просто з найвищими характеристиками.

Цей проект буде покладено у початкову стадію практичного створення кобота, з можливістю подальшого розвитку ідеї для майбутнього покращення колаборативного робота і створення здібного конкурента вже існуючим рішенням з орієнтацією на внутрішній ринок та його потреби.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СИСТЕМИ

2.1. Автоматизація системи

2.1.1. Опис в загальному вигляді природи технологічного об'єкту та процесів, що протікають в ньому

Природа технологічного об'єкта: об'єктом виступає повнорозмірна, основна роботизована рука-маніпулятор, керування якої реалізовано шляхом фізичного переміщення оператором зменшеної копії руки-маніпулятора а основна рука-маніпулятор точно відтворює ці рухи у відповідному масштабі.

Основні процеси: копіювання рухів: при переміщенні кожного з суглобів руки-маніпулятора, потенціометри, що знаходяться в них зчитують зміну куту

Передача та обробка сигналів: обчислювальний модуль Arduino виконує передачу керуючих сигналів на виконавчі механізми великої руки.

Приводне виконання рухів: Сервоприводи на виконавчій руці приймають сигнали та переміщують її зчленування у відповідному напрямку та куті.

Фізико-технічна природа процесів:

- Механічна: передача крутного моменту та переміщення ланок маніпулятора.
- Електрична: живлення та керування двигунами, передача сигналів датчиків.
- Інформаційна: збір, обробка, передача координат рухів і керуючих команд.

- Програмна: алгоритми обробки сигналів, перетворення координат, логіка керування, безпека рухів.

2.1.2. Визначення та опис регульованих параметрів, збурень і можливих дій керування

У системі керування роботом-маніпулятором, розробленій на базі мікроконтролера Arduino Leonardo та плати керування сервориводами Adafruit PWM Servo Board, передбачено безпосереднє ручне керування положенням робочих ланок за допомогою аналогових потенціометрів. Такий підхід реалізує принцип прямого управління без зворотного зв'язку, але дозволяє визначити базові керовані параметри, збурення та можливі дії регулювання.

Визначимо регульовані параметри в даній системі:

- Поворот руки на базі.
- Поворот плеча.
- Поворот передпліччя.
- Поворот зап'ястя.
- Реєстрація натиску кнопки захвату.

Визначимо можливі збурення в системі:

- Нестабільність у живленні.
- Люфти, деформація деталей.
- Вплив зовнішніх сил.

2.1.3. Складання параметричної схеми ОК

Параметрична схема області керування відображає канали впливу на об'єкт керування (ОК). Кожен об'єкт може мати один або декілька виходів, що відповідають керованим параметрам, а також відповідні входи, через які подаються керувальні дії x_i та збурення λ_i . Якщо між конкретним вхідним

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

сигналом і вихідним параметром існує функціональна залежність, це означає наявність у системі керування відповідного каналу впливу. На рис. 2.1 зображено параметричну схему ОК маніпулятора, нижче вказані фізичні величини вхідних, вихідних сигналів та збурюючих впливів.

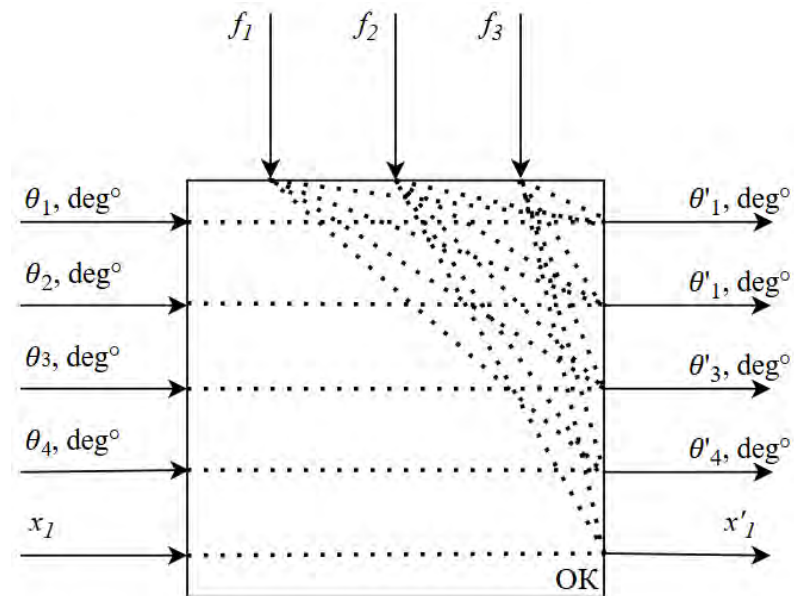


Рис. 2.1. Параметрична схема ОК.

Керувальні впливи:

- $\theta_1, \text{deg}^\circ, \theta_2, \text{deg}^\circ, \theta_3, \text{deg}^\circ, \theta_4, \text{deg}^\circ$ — кути положення потенціометрів керуючої руки.
- x_1 — сигнал від кнопки керування захватом.

Збурення:

- f_1 — Нестабільність живлення.
- f_2 — Механічна перешкода руху великої (керованої) руки.
- f_3 — Вплив зовнішніх сил.

Вихідні параметри:

- $\theta'_1, \text{deg}^\circ, \theta'_2, \text{deg}^\circ, \theta'_3, \text{deg}^\circ, \theta'_4, \text{deg}^\circ$ — кути повороту відповідних сервоприводів великої (керованої) руки.
- x'_1 — стан захвату великої (керованої) руки.

Рівняння описаних впливів:

- $\theta'_1, \text{deg}^\circ = \theta_1, \text{deg}^\circ(f_1, f_2, f_3);$
- $\theta'_2, \text{deg}^\circ = \theta_2, \text{deg}^\circ(f_1, f_2, f_3);$
- $\theta'_3, \text{deg}^\circ = \theta_3, \text{deg}^\circ(f_1, f_2, f_3);$
- $\theta'_4, \text{deg}^\circ = \theta_4, \text{deg}^\circ(f_1, f_2, f_3);$
- $x'_1 = x_1(f_2, f_3).$

2.1.4. Структурна схема

Людина починає керувати зменшеною копією руки, тим самим за допомогою датчиків змінення куту повороту передається на мікроконтролер (надалі МК), після чого МК передає команду через 6-розрядну I2C адресу на плату керування сервоприводами, яка в свою чергу передає на кожен з сервоприводів свою команду на відповідний кут повороту.

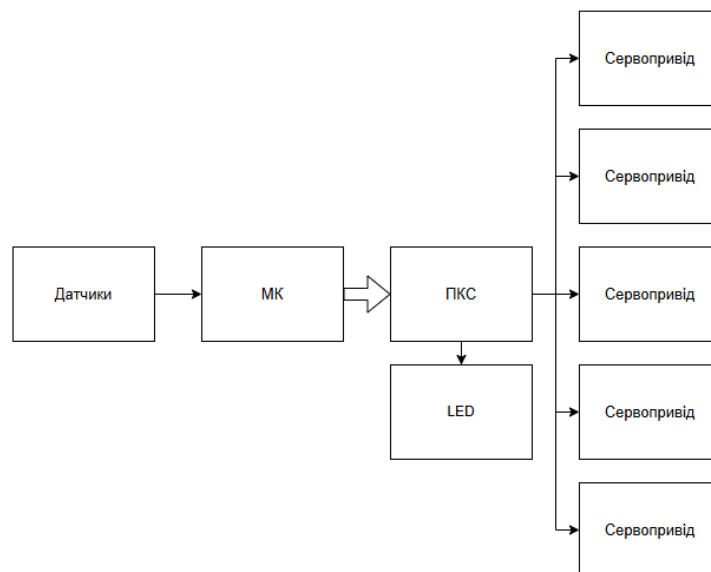


Рис. 2.1. Структурна схема системи керування руки-маніпулятора.

Опис схеми:

МК — мікроконтролер.

ПКС — плата керування сервоприводами.

LED (Light Emitting Diode) — світлодіод.

2.2 Підбір елементної бази

2.2.1. Підбір мікроконтролера

Для реалізації виконавчої частини було використано Arduino Uno Leonardo (Рис. 2.1.), який чудово підходить для поставлених задач. Він має відносно компактний корпус, що дасть змогу помістити його в основу основної руки а також зручно працювати з підключенням. Він також є надзвичайно популярним серед ком'юніті початківців та любителів у створенні власних роботів, що дасть змогу реалізовувати нові ідеї. Також він має низьку ціну та велику базу сумісних компонентів, що позитивно впливає на процес розробки [19].

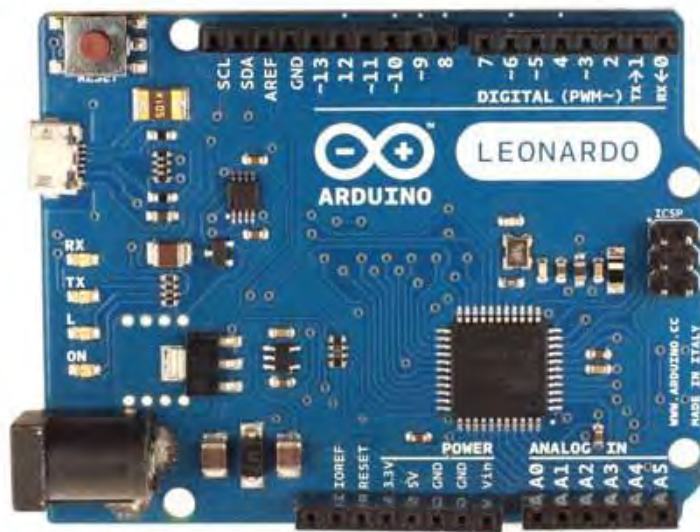


Рис. 2.1. Плата Arduino Uno Leonardo [19].

Характеристики:

- Мікроконтролер ATmega32u4.
- Робоча частота: 16МГц.
- Цифрових входів / виходів: 20 (7 з них ШІМ).

- Аналогових входів: 12.
- Робоча напруга 5В.
- Вхідна напруга (Рекомендований): 7-12В.
- Вхідна напруга (граничне): 6-20В.
- Обсяг Flash пам'яті 32 кБ (з них 4кБ зайнято під бутлоадер).
- SRAM: 2,5кБ.
- EEPROM: 1кБ.

2.2.2. Підбір модуля управління сервоприводами

Для управління сервоприводами було використано модуль PCA9685 (Рис. 2.2.). Він керує до 16 сервоприводами одночасно з точним керуванням кута, що розвантажує мікроконтролер (звільняє піни) для підключення інших пристроїв чи датчиків.



Рис. 2.2. Модуль управління сервоприводами PCA9685 [20].

Характеристики:

- Управління по шині I2C всього двома сигнальними дротами.

- На платі встановлені додаткові резистори по кожному з виходів для зручного підключення світлодіодів.
- Живлення від 3.3В з можливістю підключення до 5В пристроїв.
- Можливість підключення 6В сервоприводів.
- 6-розрядна I2C адреса.
- Регульована частота ШІМ до 1,6КГц.
- Окремий вхід джерела живлення сервоприводів або світлодіодів.
- Наявність 3-пінових роз'ємів, що дозволяють легко та просто підключити всі 16 сервоприводів до плати.
- Висока якість виготовлення модуля.
- Розміри: 62 x 25 x 15 мм.

2.2.3. Підбір сервоприводу для керування клешнею

Для роботи клешні був обраний сервопривід Tower Pro SG90 2кг 180° (Рис.2.4.) Завдяки своїм компактним розмірам та надзвичайній популярності а також з достатньою силою крутного моменту для функціонування клешні [21].



Рис. 2.4. Сервопривід Tower Pro SG90 2кг 180° [21].

Характеристики:

- Швидкість без навантаження: 0.12 сек / 60 град. при живленні 4.8В.
- Крутний момент: 2 кг / см.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

- Температурний діапазон: 0°C до +50°C.
- Ширина мертвої зони: 4 мікросекунди
- Робоча напруга живлення: 3.5-5 В.
- Споживаний струм в русі: 50-80 мА.
- Споживаний струм в утриманні: 5-10.
- Кут повороту ~180°.
- Розміри: 3.3 см х 3 см х 1.3 см вага: 9 г.

2.2.4. Підбір сервоприводів для функціонування керувальної руки робота-маніпулятора.

Для функціонування поворотних частин руки були обрані сервоприводи сервоприводи Tower Pro MG995 180° (Рис.2.5.) а також сервопривід DS3218MG-180 (Рис.2.6.). Сервоприводи Tower Pro MG995 мають достатній запас крутного моменту для належного функціонування руки-маніпулятора а DS3218MG має навіть більшу силу крутного моменту та надає певний запас для надійності конструкції [22].



Рис. 2.5. Сервопривід Tower Pro MG995 180° [22].

Характеристики Tower Pro MG995 180°:

- Редуктор: пластик (нейлон).
- Кут повороту: ~ 180° (±80° вліво-вправо).

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

- Робоча швидкість: 0.17 сек / 60 градусів (4.8В без навантаження).
- Робоча швидкість: 0.13 сек / 60 градусів (6В без навантаження).
- Пусковий момент: 8.5 кг / см при живленні 4.8В.
- Пусковий момент: 10 кг / см при живленні 6В Робоча напруга: 4.8 - 7.2 В.
- Робоча температура середовища: 0 ... +55 °С.
- Діаметр вала: 5.7 мм.
- Довжина дроту 30 см.
- Розміри 40.7 x 19.7 x 43 мм.
- Маса 55г.



Рис. 2.6. Сервопривід DS3218MG-180 [23].

Характеристики DS3218MG-180°:

- Модель: DS3218MG-180 (25T).
- Частота PWM: 50-333 Hz.
- Тип редуктора: металевий.
- Кут повороту: 180°.
- Робоча напруга: 4.8 - 6.8 В / 2.0 - 2.5А.
- Швидкість повороту (5.0В): 0.16 с / 60°.
- Швидкість повороту (6.8): 0.14 с / 60°.
- Зусилля тяги (5.0В): 18 кг.
- Зусилля тяги (6.8В): 21 кг.
- Розміри сервоприводу: 40 x 40.5 x 20 мм.
- Вага: 68г.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

2.2.5. Підбір блока живлення

Для подачі живлення був використаний блок живлення SHNITPWR SNT-0312-120 (Рис. 2.3.) за наявності певних характеристик, таких як: можливість видавати силу струму до 10А а також можливість видавати напругу в потрібному діапазоні в 5-7В та навіть більше. Сумарна віддача становить до 120Ватт, що йде лише на користь, адже запас потужності в результаті призведе до зменшених температур. Також зручною особливістю є наявність РК-дисплею, що в реальному часі показує поточний струм в точності до сотих. Також має хороший перелік захистів [24].



Рис. 2.3. Блок живлення SHNITPWR SNT-0312-120.

Характеристики:

- Вхід: AC 100–240 В, 50/60 Гц.
- Вихід: DC 4–12 В (регульований), макс. 10 А, 120 Вт.
- Дисплей: РК-екран показує напругу.
- Сумісність: Працює з будь-якою напругою від 3 до 12 В та струмом до 10 А (напр. 300 мА, 1А, 5А, 10А тощо).
- Захист від: перенапруги, перевантаження по струму, перегріву, короткого замикання.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі було здійснено поетапну розробку системи автоматизованого керування промисловим роботом-маніпулятором, проведено аналіз принципу роботи системи, визначено ключові керовані параметри, основні збурення та варіанти дій керування. Було складено параметричну та структурну схеми області керування, що дозволяють графічно відобразити взаємозв'язки між вхідними, вихідними сигналами та зовнішніми впливами.

На основі технічного завдання здійснено підбір відповідної елементної бази для реалізації керування: обрано мікроконтролер Arduino Leonardo, плату керування сервоприводами PCA9685, сервомеприводи різного типу залежно від функціонального призначення, а саме: MG995, DS3218, SG90. А також було підібрано універсальний блок живлення, здатний забезпечити стабільну роботу всієї системи.

У результаті було закладено основу, яка дозволяє приступити до виконання програмної та фізичної частини робота-маніпулятора, задача якого, це точне копіювання рухів зменшеної (керуючої) моделі руки на виконавчий модуль великої (керованої) руки у реальному часі.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ

У цьому розділі буде проведено розрахунковий аналіз ключових параметрів конструкції роботизованої руки-маніпулятора, реалізованої на основі Arduino Leonardo, сервоприводів SG90 для затиску об'єктів, MG995 для поворотної бази, ліктя та зап'ястної частини а також DS3218MG для плечової частини на якій буде максимальне навантаження по вертикальній осі. Розрахунки мають на меті підтвердити вибір компонентів, оцінити навантаження на вузли системи, визначити енергоспоживання, точність повторення рухів та загальну динаміку відгуку системи.

3.1. Розрахунок енергоспоживання робота-маніпулятора

У процесі проектування руки-маніпулятора важливим етапом є оцінка енергоспоживання всіх компонентів. Це дозволяє правильно підібрати джерело живлення, уникнути перегріву та забезпечити стабільну роботу всіх вузлів.

Система матиме живлення у 5-6В. А нижче наведено перелік даних щодо сили струму споживаної компонентами:

- За розтискання клешні (захватної частини) відповідає сервопривід Tower Pro SG90, що має споживання струму в русі до 0.1А.
- За функціонування таких частин, як: кисть, передпліччя та поворотна частина бази відповідають сервоприводи Tower Pro MG995, що мають пікове споживання у 1.5А.
- А за плечовий механізм відповідає сервоприводи DSSERVO DS3218MG-180, що мають піковий струм у 2.5А.
- Сумарне споживання мікроконтролера та плати керування сервоприводами не перевищує 0.2А.

Оскільки всі сервоприводи живляться паралельно то сила струму буде додаватися і для обчислення струму буде використано наступну формулу:

$$I_{\text{заг}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n, [\text{A}].$$

Напруга в такому випадку буде однаковою для всіх сервоприводів.

$$U_{\text{заг}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n, [\text{В}].$$

Для визначення загальної потужності буде використано таку формулу:

$$P = U * I, [\text{Вт}].$$

Перейдемо до розрахунків:

Піковий струм, що необхідний системі:

$$I_{\text{заг}} = 0.1 + 3 * 1.5 + 2.5 + 0.2 = 7.3 [\text{A}]$$

Пікова потужність споживана системою:

$$U_{\text{заг}} = 6 [\text{В}]$$

Загальна пікова потужність системи:

$$P = 6 * 7.3 = 43.8 [\text{Вт}]$$

Для забезпечення стабільної роботи, необхідно використовувати джерело живлення з запасом 15-20% від максимальних характеристик заявлених виробником для досягнення оптимального ККД приладу та зменшення нагріву і як наслідок продовження строку служби. Отже, підібраний блок живлення, що має діапазон роботи в межах від ~4В до 12В та здатен видавати силу струму до 10А є оптимальним варіантом для даної руки-маніпулятора.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

3.2. Розрахунок точності відтворення та відгуку системи

Оцінка точності відтворення рухів буде базуватися на кількості кроків цифрового перетворення, механічній похибці сервопривода та точності відтворення.

Діапазон потенціометрів, що буде використовуватися, становить 180 градусів. Як наслідок діапазон аналогового сигналу 10-бітового АЦП Arduino звужується з 1024 положень до приблизно 560.

В такому випадку кутова роздільна здатність становитиме:

$$\alpha = \frac{180}{560} = 0.32^\circ$$

Допустима похибка сервоприводів становить $\pm 1^\circ$, тому сумарна похибка відтворення становитиме:

$$\varepsilon = \pm 1.32^\circ$$

Такої точності цілком достатньо для демонстрації роботи пристрою.

Щодо затримок, то проведене дослідження на Gammon Forum [25] стверджує, що обробка даних займатиме приблизно 100 мікросекунд, тоді як обробка даних може займати ще менше часу. Основним обмеженням щодо швидкості реакції і повтору рухів людини буде виступати швидкість оберту сервоприводу, для Tower Pro MG995 швидкість оберту на 60° становить 0.15 секунд за умови живлення у 6В.

Такі затримки цілком прийнятні для адекватно сприйняття в реальному часі і не потребуватиме зусиль для прогнозування подальших рухів.

Також можна дійти висновку, що оскільки основним фактором, що впливає на затримку, є час реакції сервоприводу, то вибір мікроконтролера не обмежує руку-маніпулятор у швидкодії і не потребує дорожчих і потужніших аналогів.

3.3. Розрахунок необхідного крутного моменту на поворотний механізм бази руки-маніпулятора

Сервопривід, що знаходиться в базі руки-маніпулятора несе на собі найбільше навантаження, оскільки тримає на собі всі інші поворотні частини. Тому необхідним є проведення теоретичних розрахунків для розуміння того чи правильно підібрано сервопривід для поворотного механізму.

Нижче наведено перелік вихідних даних, що допоможуть здійснити розрахунок крутного моменту необхідного для функціонування поворотного механізму:

- Плечова частина має масу 135 грам а центр мас знаходиться на відстані у 3см.
- Передпліччя руки-маніпулятора має масу 180 грам з центром мас на відстані 6см.
- Клешня з вантажем у 200 грам матиме сумарну масу 250 грам та може знаходитись на відстані 22см.

Розрахунки будуть проведені за формулою обчислення крутного моменту:

$$M = F * d, [\text{Н/м}], \text{ де}$$

F – сила, що прикладається до об'єкта.

d – плече сили.

Формула для визначення сили:

$$F = m * g, [\text{Н}], \text{ де}$$

g – сила тяжіння (9.81м/с).

Тоді формула для визначення моменту сили буде виглядати таким чином:

$$M = m * g * d.$$

Перейдемо до обрахунків:

$$M_{\text{заг}} = 0.135 * 9.81 * 0.03 + 0.180 * 9.81 * 0.05 + 0.250 * 9.81 * 0.22 = 0.685$$
$$[\text{Н/м}]$$

Оскільки, Tower Pro MG995 має заявлений крутний момент у 10 кг/см при 6В, переведемо це значення у Н/м за формулою [26]:

$$1 \text{ кг/см} = 9.80665 \text{ Н/м} * 0.01 \text{ м/см}.$$

В даному випадку маємо 10 кг/см, тоді

$$M_{\text{сер}} = 10 * 9.80665 * 0.01 = 0.980665 [\text{Н/м}].$$

Розрахуємо коефіцієнт запасу, що обчислюється за формулою:

$$K = \frac{M_{\text{заг}}}{M_{\text{сер}}} = \frac{0.98}{0.685} = 1.43$$

Це означає, що підібраний сервопривід має запас крутного моменту у ~43%.

Висновок до розділу 3

У результаті проведених розрахунків було доведено доцільність використаних зарання підібраних сервоприводів у проєкті руки-маніпулятора, що мають достатній запас крутного моменту. Також було обґрунтовано використання мікроконтролера Arduino Leonardo та плати керування сервоприводами, які не створюють відчутних затримок та не впливають на здатність сприймати відтворені рухи руки-маніпулятора в режимі реального

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

часу. До того ж було проведено аналіз енергоспоживання системи, що дало впевненість, що підібраний блок живлення буде використовуватись в безпечних межах його роботи.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

РОЗДІЛ 4. ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ І ПРОГРАМНОГО АЛГОРИТМУ ТА ДРУК КОМПЛЕКТУЮЧИХ

4.1. Розробка 3D моделі для друку

4.1.1. Вибір 3D-моделі для проєкту

Основою для реалізації проєкту було взято 3D-модель Compact Robot Arm, розміщену на платформі Printables [27] та на YouTube каналі Build Some Stuff [28] через набір переваг, що будуть перераховані нижче:

- Модульна структура конструкції, що дозволяє вносити окремі зміни в певні частини руки-маніпулятора та зручно друкувати компоненти на 3D-принтері.
- Компактність моделі, яка має оптимізований дизайн а також дозволяє економити матеріали та зробити модель економічно доцільніше.
- Сумісність з компонентами, що були обрані для проєкту.
- Схожість до конструкції до реальних продуктів на ринку промислових роботів.

4.1.2. Вибір середовища розробки для підготовки 3D моделі

Основні процеси по створенню та редагуванню 3D моделей частин руки робота-маніпулятора було зроблено в САПР Autodesk Fusion 360 (Рис.4.1.). Вибір був між такими САПР як SolidWorks та Fusion 360.

Однією з ключових переваг та вимогою до САПР була можливість працювати на операційній системі (ОС) macOS. Fusion 360 надає цю можливість роботи на різних ОС, зокрема і на операційній системі, тоді як

SolidWorks обмежений лише роботою в ОС Windows, що обмежує використання програмного середовища. Це дозволяє здійснювати безперебійну роботу над моделлю без необхідності використання емуляторів або віртуальних машин, що сповільнює продуктивність та час автономної роботи на ноутбуку і відповідно впливає на працездатність, коли немає доступу до домашнього робочого місця.

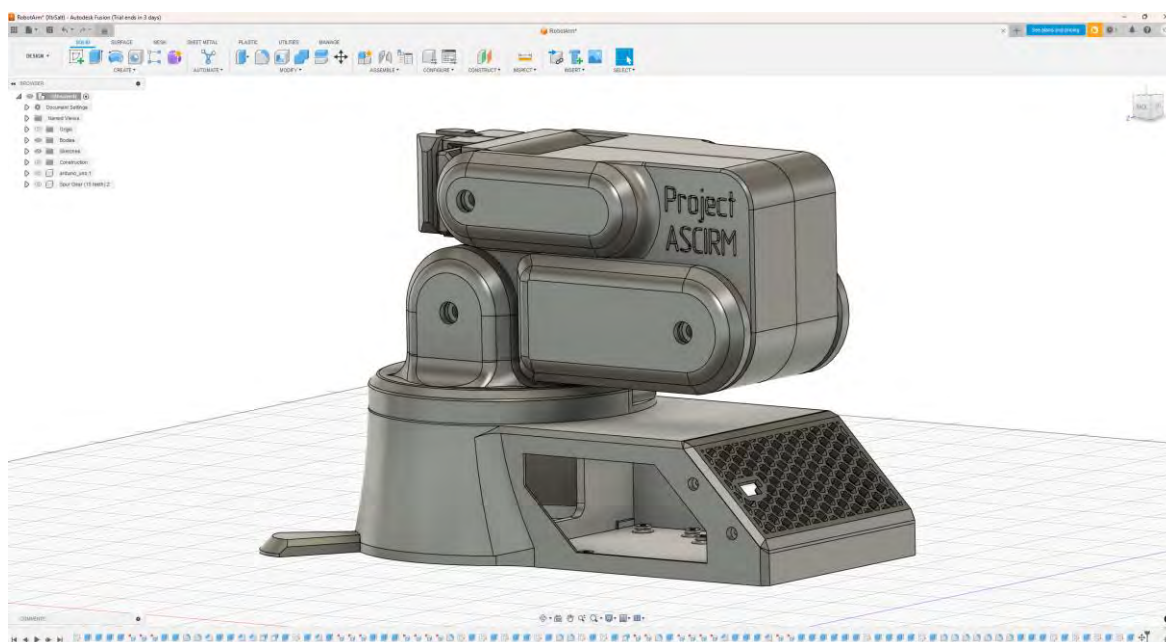


Рис.4.1. Інтерфейс САПР Autodesk Fusion 360 та модифікована 3D-модель [27].

4.1.3. Підбір слайсера для підготовки 3D-моделі до друку

Для підготовки 3D-моделей до друку було обрано OrcaSlicer — сучасне програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, яке є модифікованою версією програми Bambu Studio, в свою чергу створеної на основі PrusaSlicer. Оскільки друк проводився на принтері Bambu Lab A1 MINI, то наявність профілів для цього принтера також була плюсом. Завдяки цьому OrcaSlicer поєднує в собі найкращі можливості кількох популярних рішень для нарізки

3D-моделей, зберігаючи гнучкість налаштувань і високу сумісність із широким спектром 3D-принтерів.

На рисунку 4.3. представлено попередній перегляд 3D-друку деталей маніпулятора у слайсері OrcaSlicer з візуалізацією шарів та підтримок.

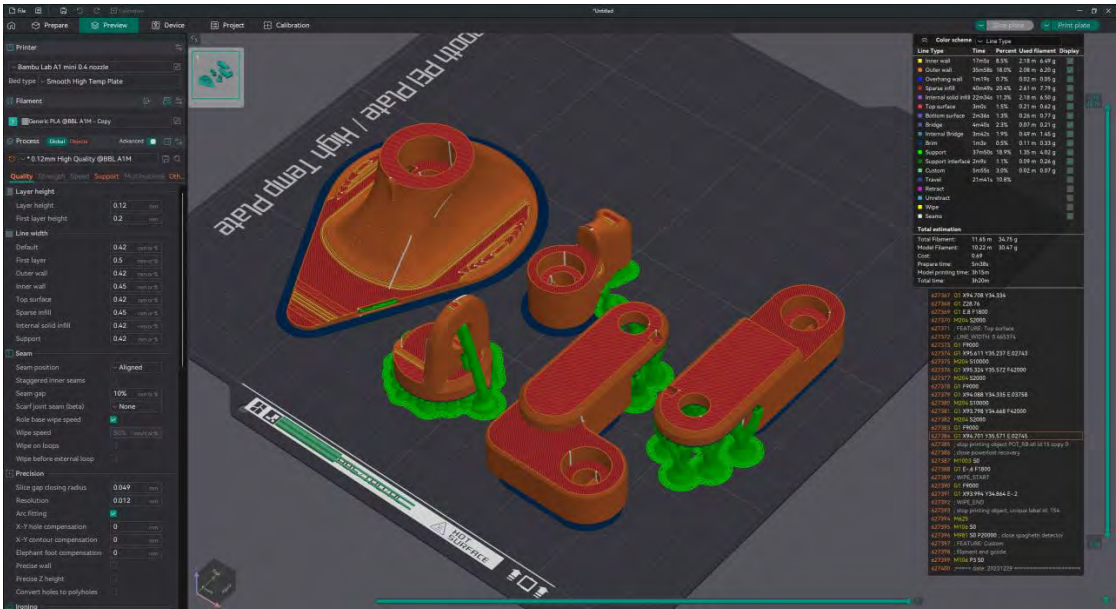


Рис. 4.3. Попередній перегляд 3D-друку деталей маніпулятора у слайсері Orca Slicer з візуалізацією шарів та підтримок.

У таблиці 4.1. наведено коротке порівняння ключових характеристик слайсерів.

Таблиця 4.1.

Параметри	OrcaSlicer	Bambu Studio	PrusaSlicer	Cura
Інтерфейс	Простий та сучасний	Простий та сучасний	Класичний, менш інтуїтивний	Перевантажений
Гнучкість налаштувань	Висока	Дещо обмежена	Висока	Висока але потребує плагінів
Сумісність	Широка	Обмежено принтерами Bambu Lab	Широка	Широка

OrcaSlicer побудована на основі Bambu Studio, який, у свою чергу, базується на PrusaSlicer. Завдяки цьому OrcaSlicer успадковує найсучасніші рішення у галузі підготовки G-коду та обробки 3D-моделей. Програма зберігає сумісність із багатьма профілями від Bambu Lab, але при цьому відкрита для використання з будь-якими FDM-принтерами.

Завдяки спадку від Bambu Studio, OrcaSlicer має такий же дизайн як і у Bambu Studio, що впливає в інтуїтивно зрозумілий, функціональний і простий, неперевантажений інтерфейс з гнучкими налаштуваннями й підказками в реальному часі.

OrcaSlicer забезпечує високий рівень контролю над процесом підготовки моделі до друку завдяки розширеному функціоналу, що поєднує сучасні можливості Bambu Studio та функції, що представлені у конкурентних продуктах.

4.1.4. Вибір матеріалу для друку

Керована частина робота маніпулятора:

Для друку великої руки було використано пластик PETG завдяки таким властивостям як: висока міцності на розрив, витримування високих навантажень, висока хімічна стійкість а також стійкості при нагріві до 80 °C і стійкості до ультрафіолету.

Таким чином, PETG — оптимальний вибір для друку великогабаритної функціональної частини, яка має витримувати навантаження, рух та зовнішні умови, на відміну від PLA, що буде більше підходити для невеликих або малонавантажених компонентів.

Керуюча частина робота маніпулятора:

При друку перших прототипів був обраний той же матеріал, що і для великої руки та при тих же налаштуваннях, проте при тесті на стійкість до

механічних пошкоджень було виявлено слабку міжшарову адгезію, що призвело до зламу в точках високого навантаження (Рис.4.2.).

В ході дослідження проблеми стало відомо, що причиною стало використання недостатнього нагріву сопла через що шари між собою мали недостатню адгезію а також мала площа контакту у маленьких деталях керуючої руки.

Тому матеріалом для друку керуючої руки у фінальному варіанті було обрано PLA пластик, а також з огляду на його схожі характеристики до PETG пластику. PLA має кілька мінусів, які є несуттєвими у випадку керуючої руки, а саме: нижчу стійкість до температури до 60°C, меншу стійкість до ультрафіолету та меншу витривалість до високих навантажень. Оскільки, керуюча рука буде знаходитись в приміщенні під керуванням оператора то високі температури та високі навантаження не будуть застосовуватися.



Рис.4.2. Фото зламаних частин керуючої руки робота-маніпулятора.

4.1.5. Підбір параметрів для друку

У процесі розробки робота-маніпулятора важливим етапом є виготовлення конструктивних елементів, що забезпечують його функціональність та точність руху. З огляду на це, для прототипування було обрано технологію FDM-друку, яка дозволяє швидко виготовляти деталі зі складною геометрією з полімерних матеріалів. У даному розділі буде описано вибір матеріалу, технологічного обладнання, а також налаштування параметрів друку, необхідних для отримання якісних, міцних і функціонально придатних компонентів маніпулятора.

Параметри для керованої частини руки робота-маніпулятора:

Для великої руки робота маніпулятора було застосовані менш точні параметри, зокрема щодо товщини шару та згладжування. Підтримки деталей на пластині були виконані з того ж матеріалу з умовою зупинки друку при переході з підтримок на друковану частину деталей для нанесення на верхню площину підтримок шару перманентного маркеру для кращого відриву підтримок.

Параметри для керуючої частини руки робота-маніпулятора:

Враховуючи фактори, що призвели до поломки попередніх прототипів то було більш ретельно підібрано параметри якості друку та підтримок.

На рисунку 4.4. наведено опис параметрів якості друку та параметрів підтримок.



а)

б)

Рис.4.4. Опис налаштувань якості (рис. а) та налаштувань підтримок (рис. б)

Параметри якості друку:

- Висота шару: 0.12 мм — забезпечує баланс між якістю поверхні та часом друку.
- Висота першого шару: 0.2 мм — покращує адгезію до платформи.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ПК 11.08.1760.000 ПЗ

Арк.

51

- Ширина екструзії: встановлено різні значення для зовнішніх стінок (0.42 мм), внутрішніх (0.45 мм) та топових шарів (0.42 мм) для досягнення високої точності.

Параметри підтримок:

- Тип підтримки: деревовидна (Tree), автоматичне визначення необхідності підпірок.
- Кут нависання (threshold angle): 50° — підтримка генерується для ділянок з більшим кутом.
- Обмеження: підтримка лише на столі — зменшує площу контакту, полегшує зняття та менш впливає на якість поверхні деталі.
- Інтерфейс підтримки: активовано, для покращеного відділення від деталі.

4.2. Розробка електричної принципової схеми

Для забезпечення правильного підключення компонентів та стабільності роботи було розроблено електрично-принципову схему підключення компонентів, реалізованої на основі раніше підібраних мікроконтролера Arduino Leonardo, зовнішньої плати керування сервоприводами Adafruit PCA9685 та сервоприводи з потенціометрами. Загальний вигляд електричної принципової схеми наведено у додатку А.

Нижче буде описано підключення по ключовим складовим схеми.

4.2.1. Сервоприводи Tower Pro SG90 та MG995 а також DSSERVO DS3218MG.

Сервоприводи підключені до плати керування Adafruit PCA9685 через розведені піни. Кожен з сервоприводів підключений до PWM виходу та до живлення і заземлення.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

4.2.2. Плата керування сервоприводами Adafruit PCA9685

У додатку Б наведено електричну принципову схему плати керування сервоприводами, яка підключена до мікроконтролера за допомогою пінів SCL і SDA, через шину I²C до відповідних пінів SCL та SDA у мікроконтролера. Живлення у 5-6В на плату керування сервоприводами подається окремо, від стороннього блоку живлення SHNTPWR SNT-0312-120, який підключений до плати через відповідні піни для живлення.

4.2.3. Мікроконтролер Arduino Leonardo

У додатку В наведено електричну принципову схему мікроконтролера Arduino Leonardo, що виконує роль головного обчислюваного модуля, який зчитує аналогові сигнали з потенціометрів з входів A0-A3 та кнопки на цифровий пін 13 та передає PWM сигнали на плату через шину I²C. Для живлення плата мікроконтролера використовує підключення від плати керування сервоприводами

4.2.4. Потенціометри B10K

Потенціометри використовуються для зчитування положень керуючої руки-маніпулятора. Підключені до аналогових входів A0-A3 мікроконтролера а також мають підключення живлення +5В та заземлення.

4.2.5. Кнопка DIP 6x6x5мм

Використовується для відкриття клешні керованої руки-маніпулятора. Кнопка підключена до цифрового піна 13 мікроконтролера Arduino Leonardo та до заземлення.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

4.2.6. Індикаторний світлодіод

Використовується для показу стану системи. Підключений до піна живлення мікроконтролера 3.3В через резистор та до заземлення.

4.3. Розробка алгоритму програмного забезпечення

У додатку Г наведено вигляд алгоритму роботи програми, що ліг в основу розробленого програмного забезпечення, наведеного у додатку Д, для керування роботом-маніпулятором реалізованого на мікроконтролері Arduino Leonardo з використанням модуля PWM-драйвера Adafruit PCA9685 та аналогових потенціометрів.

4.3.1. Ініціалізація системи

На цьому етапі відбувається підготовка всіх необхідних апаратних засобів та програмних бібліотек для подальшої роботи:

- Затримка для стартового положення. Програма робить паузу на 5 секунд, щоб дати користувачу час привести робота в початкове (стартове) положення вручну.
- Налаштування ШІМ для сервоприводів. Ініціалізується драйвер ШІМ (Adafruit_PWMServoDriver) та встановлюється частота ШІМ на 50 Гц, що є стандартною для більшості сервоприводів.
- Встановлення початкового положення захоплювача. Сервопривід, що відповідає за "руку" або захоплювач, встановлюється в початкове відкрите положення (кут 90 градусів).
- Налаштування входу кнопки: Цифровий пін 13 налаштовується як вхід з внутрішнім підтягуючим резистором (INPUT_PULLUP) для зчитування стану кнопки.

4.3.2. Основний цикл роботи

Цей блок є серцем програми, він виконується безперервно, забезпечуючи постійний контроль над рухом робота:

- Керування рухом суглобів. Для кожного суглоба робота (зап'ястя, лікоть, плече, основа) програма читає вхідні дані з відповідних потенціометрів та плавно переміщує сервоприводи.
 - Зчитується значення потенціометра для зап'ястя (A3) та відповідно переміщується сервопривід зап'ястя.
 - Зчитується значення потенціометра для ліктя (A2) та відповідно переміщується сервопривід ліктя.
 - Зчитується значення потенціометра для плеча (A1) та відповідно переміщується сервопривід плеча.
 - Зчитується значення потенціометра для основи (A0) та відповідно переміщується сервопривід основи.
- Перевірка стану кнопки захоплювача. Програма перевіряє, чи натиснута кнопка, яка керує захоплювачем.
 - Якщо цифровий вхід 13 (кнопка) знаходиться в стані LOW (натиснута), сервопривід клешні встановлюється на кут 180 градусів (закрите положення). У послідовний порт виводиться повідомлення "Grab".
 - В іншому випадку (якщо кнопка не натиснута), сервопривід клешні встановлюється на кут 90 градусів (відкрите положення).
- Після всіх операцій циклу виконується коротка затримка в 10 мілісекунд, щоб зменшити навантаження на процесор та уникнути різких ривків у русі сервоприводів.

4.3.3. Реалізація функції плавного переміщення

Ця функція відповідає за плавне переміщення кожної окремої частини руки-маніпулятора, використовуючи алгоритм інтерполяції рухів, що запобігає різким рухам:

- Функція отримує вхідний сигнал з аналогового потенціометра.
- Перетворення значення потенціометра в цільовий імпульс: Зчитане значення потенціометра (в діапазоні від 800 до 240) перетворюється на цільову ширину імпульсу (targetPulse) в діапазоні від MIN_PULSE_WIDTH (650) до MAX_PULSE_WIDTH (2350).
- Розрахунок цільового значення ШІМ, targetPulse перетворюється на targetPWM, що є внутрішнім значенням для керування ШІМ-драйвером.
- Встановлюється фіксований "крок" (step = 5), який визначає, наскільки зміниться положення сервоприводу за один раз.
- Проводиться перевірка на абсолютну різницю між цільовим положенням (targetPWM) та поточним положенням сервоприводу (lastPulse).
 - Якщо абсолютна різниця більша за "крок", це означає, що сервоприводу потрібно рухатися.
 - Якщо абсолютна різниця менша або дорівнює "кроку", це означає, що сервопривід майже досяг цільового положення, тому lastPulse встановлюється рівним targetPWM.
- Встановлення нового положення сервоприводу. Сервопривід (motorOut) встановлюється в нове, плавно оновлене положення (lastPulse).

Висновок до розділу 4

У цьому розділі було обґрунтовано вибір 3D-моделі для проєкту руки-маніпулятора. Було детально роз'яснено причини вибору певних програм для реалізації різних задач по проєктуванню, модифікації 3D-моделі, підбору слайсера та матеріалів, що були обрані для дурку компонентів руки-маніпулятора. Все це забезпечує функціональність та надійність конструкції.

Також було розроблено електрично-принципову, де детально було розписано схему підключення на основі якої було зібрано функціональну модель руки-маніпулятора. Після цього було розроблено схему алгоритм роботи програми руки-маніпулятора, що стало основою для написання коду для руки-маніпулятора, що в свою чергу надав можливість реалізувати на прототипі бажаний функціонал.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

ВИСНОВКИ

У цій дипломній роботі на тему: «Автоматизована система керування маніпулятором промислового робота» було виконано повний цикл робіт, починаючи від аналізу ринку до створення та випробування прототипу, що дало змогу досягти поставленої мети та підтвердити практичну доцільність запропонованого рішення.

У першому розділі було доведено, що колаборативні маніпулятори є оптимальною відповіддю на виклики децентралізації виробництва, дефіциту кадрів і запитів безпеки в умовах сучасної України. Також було сформульовано технічне завдання, яке враховує потреби малого та середнього бізнесу у відносно бюджетній, гнучкій та швидко впроваджуваній автоматизації для виробництв. Та розроблено попередню концепцію руки-маніпулятора, що керуватиметься зменшеною копією.

Другий розділ став основою для опису процесів, що відбуваються у системі та розробки параметричної та структурної схем. До того ж було проведено детальний аналіз підбору комплектуючих системи для забезпечення балансу між можливостями руки-маніпулятора та його економічною доцільністю.

У третьому розділі було проведено розрахунки енергоспоживання системи, для розуміння необхідних параметрів для підбору блоку живлення (надалі БЖ), в наслідок якого підібраний БЖ мав достатній запас для ефективної роботи. Також в розрахунках було обчислено загальний відгук системи а проаналізовано точність відтворюваних рухів керованої руки-маніпулятора. Фінальним розрахунком було обчислення необхідного крутного моменту сервоприводу, що знаходиться в базі руки-маніпулятора та має велике навантаження. Результатом всіх розрахунків стало доведення, що підібрані компоненти цілком підходять під поставлені задачі і відповідають вимогам.

Четвертий розділ був присвячений розробці 3D-моделі, її модифікації та виборам програм, що використовувалися під час виконання різних типів завдань. Розробка електричної принципової схеми з детальним розбором схеми підключення компонентів лягла в основу збірки реального прототипу. Після цього було розроблено програмний код, що дав змогу реалізувати поставлені функції.

Розроблений проєкт успішно виконує поставлені задачі та виконує мету дипломної роботи. Отримані практичні навички зі створення власної руки-маніпулятора, що має перспективи розвитку, будуть слугувати для подальшого вдосконалення руки-маніпулятора до того, щоб стати повністю функціональним коботом, здатного задовільнити потреби в першу чергу нашого ринку та стати самостійним продуктом у сфері автоматизації.

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. SKLAD SERVICE Комплексні рішення для складу [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://ssk.ua/ua/product/sistemy-ukladki-gruzov-na-poddony-348>
2. Всеукраїнський STEM-фестиваль Robotica, 2020 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.facebook.com/share/p/199GDa4CYN/>
3. Manufacturer Adoption of Collaborative Robots is Strong, Becoming More Aggressive in the Near Term, 2017 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.abiresearch.com/press/manufacturer-adoption-collaborative-robots-strong->
4. Global Remote Manipulator Market Research Report / Графік середньорічного темпу зростання (CAGR), 2024 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу:
https://www.wiseguyreports.com/uploads/info_graphics/Remote_Manipulator_Market_1.webp
5. Global Remote Manipulator Market Research Report, 2024 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу:
<https://www.wiseguyreports.com/reports/remote-manipulator-market>
6. Global Remote Manipulator Market Research Report / Графік розподілу ринку, 2024 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу:
https://www.wiseguyreports.com/uploads/info_graphics/Remote_Manipulator_Market_3.webp
7. Кобот Universal Robots UR12e [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.universal-robots.com/products/ur12e/>
8. Серія коботів Universal Robots e-Series [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.universal-robots.com/da/produkter/e-series/>
9. Інформаційна сторінка FANUC CRX-10iA/L [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://crx.fanuc.eu/uk/fanuc-cobot-crx-10ia-1-2/>

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

10. Кобот FANUC CRX-10iA/L [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://crx.fanucamerica.com/crx-10ia>
11. Кобот Techman TM12S [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.tm-robot.com/en/tm12s/>
12. Відеодемонстрація роботи Techman TM12S, V2A012 TM Robot - Metal Polishing Application for Cars [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.youtube.com/watch?v=Ovhj4SA5dkk>
13. Інформаційна сторінка кобота ABB GoFa™ CRB 15000 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/crb-15000>
14. Кобот KUKA LBR iiwa 14 R820 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: https://my.kuka.com/s/product/lbr-iiwa-14-r820/01t58000002hnktAAA?language=en_US&tab=Details
15. Інформаційна сторінка серії коботів KUKA LBR iiwa [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/industrial-robots/lbr-iiwa>
16. Кобот AUBO-i10 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.aubo-cobot.com/public/i5product3?CPID=i10>
17. Кобот DOOSAN M1013 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.doosanrobotics.com/en/product-solutions/product/m-series/m1013/>
18. Machinery Investment & Valuation System, 2021 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.cncbul.com/urun/doosan-h2515-doosan-m1013-robots-year-2021/>
19. Arduino Uno Leonardo docs [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardLeonardo>
20. 16-канальний 12-bit PWM/Servo модуль з I2C інтерфейсом на PCA9685 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://arduino.ua/prod1442-16-kanalnii-12-bit-pwm-servo-modyl-s-i2c->

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

[interfeisom-na-](#)

[pca9685?srsId=AfmBOoonmdK23_avR3q9Q8mSoiJ1nPoc2kR3a2Yuw8mvZsFsjnfR71wu](#)

21. Сервопривід Tower Pro SG90 2кг 180° [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://arduino.ua/prod416-servoprivod-sg90-2kg>

22. Сервопривід Tower Pro MG995 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://arduino.ua/prod2551-servoprivid-tower-pro-mg995-180>

23. Сервопривід DSSERVO DS3218MG [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://arduino.ua/prod5842-servoprivid-ds3218mg-180-metal-redyktor-20kg>

24. БЖ SHNITPWR SNT-0312-120 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://shnitpwr.com/products/shnitpwr-4v-12v-power-supply-10a-120w-ac-to-dc-adapter-dc-4v-4-5v-5v-6v-7v-8v-9v-10v-11v-12v-voltage-adjustable-universal-power-converter-transformer-100-240v-ac-in-with-14-tips-polarity-converter>

25. ADC conversion on the Arduino (analogRead) [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://gammon.com.au/adc>

26. Кілограм-сила [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%96%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC-%D1%81%D0%B8%D0%BB%D0%B0>

27. Compact Robot Arm [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.printables.com/model/818975-compact-robot-arm-arduino-3d-printed>

28. Build Some Stuff [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://www.youtube.com/@buildsometuff>

29. Global Collaborative Robot Market: Key Trends and Growth Analysis 2024 [Електронний ресурс] – режим доступу до ресурсу: <https://statzon.com/insights/global-collaborative-robot-market>

30. Долиненко В.В. Роботизована система неруйнівного вихрострумowego контролю виробів зі складною геометрією

					ПК 11.08.1760.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

31. В.В. Долиненко, Є.В. Шаповалов, Т.Г. Скуба, В.О. Коляда, Ю.В. Куц, Р.М. Галаган, В.В. Карпінський // Автоматическая сварка. – Київ. – 2017. - № 5-6 (764). – С. 60-67
32. Куц Ю.В. Спеціальні розділи математики. Курс лекцій: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 180 с.
33. Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 115 с.
34. Баженов В.Г. Електроніка. Лабораторний практикум: навчальний посібник / В. Г. Баженов, Є. Ф. Суслов, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 70 с.
35. Куц Ю.В. Новітні системи та технології: навчальний посібник / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, А.С. Момот; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 123 с.
36. Спеціальні розділи математики: конспект лекцій : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко, В. М. Сокурєнко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 192 с.