

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій

(повна назва кафедри)

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри



В. М. Рябенський

д.т.н., професор

« 15 » грудня 2025 р.

Кваліфікаційна робота

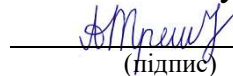
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Реалізація робота-маніпулятора з використанням технології 3D-
друку

Виконав: студент

6321М групи

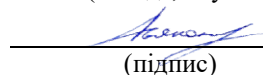

(підпис)

А. І. Трешнюк

Керівник роботи:

к.т.н., доцент, доц. каф. ПЕЕТ

(посада, науковий ступінь, вчене звання)


(підпис)

О. С. Дьяконов

м. Миколаїв – 2025 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра	програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій
Спеціальність	171 «Електроніка»
Освітня програма	Електронні системи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

В. М. Рябенський

(підпис)

« 09 » жовтня 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «магістр» (освітньо-кваліфікаційний рівень)

Студенту Трешнюку Андрію Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Реалізація робота-маніпулятора з використанням технології 3D-друку

керівник роботи Дьяконов Олексій Сергійович, к.т.н., доцент, доц. каф. ПЕЕТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора № 1217 від « 14 » жовтня 2025 року.

2. Термін подання роботи: 09 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані по роботі:

3D-моделювання та 3D-друк

мікрокомп'ютер Raspberry Pi 3 B+

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)

Аналітичний огляд роботів-маніпуляторів та технологій 3D-друку

Розробка апаратної частини робота-маніпулятора Nityo One з використанням технології 3D-друку

Розробка програмної частини системи керування роботом-маніпулятором

Охорона праці

5. Перелік презентаційних матеріалів

1. Структурна схема робота-маніпулятора Nityo One.

2. Елементна база, що використовувалась для збірки робота-маніпулятора.

3. Конструювання та моделювання механічних компонентів.

4. Архітектура програмного забезпечення.

5. Блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тубальцев А.М., доц. каф. екології та природоохоронних технологій		

7. Дата видачі завдання « 15 » жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналітичний огляд роботів-маніпуляторів та технологій 3D-друку	10.09.2025	виконано
2.	Розробка апаратної частини робота-маніпулятора Niryo One з використанням технології 3D-друку	01.10.2025	виконано
3.	Виготовлення деталей методом 3D-друку	18.10.2025	виконано
4.	Розробка програмної частини системи керування роботом-маніпулятором	07.11.2025	виконано
5.	Реалізація моделей кінематики та планування рухів	26.11.2025	виконано
6.	Підготовка розділу з охорони праці, оформлення кваліфікаційної роботи	05.12.2025	виконано

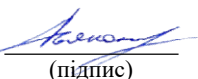
Студент


 (підпис)

А. І. Трешнюк

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


 (підпис)

О. С. Дьяконов

(прізвище та ініціали)

Анотація

Кваліфікаційна робота присвячена реалізації робота-маніпулятора Niryo One із використанням технологій 3D-друку. Виконано огляд сучасних маніпуляторів та аналіз конструктивних рішень платформи. Розглянуто гібридну приводну систему, що поєднує крокові двигуни та сервоприводи, а також застосування Raspberry Pi 3 B+ як центрального модуля керування. Подано розробку апаратної частини, моделювання та виготовлення деталей, а також тестування програмної системи керування з реалізованими кінематичними моделями й алгоритмами планування рухів. Робота також містить рекомендації з охорони праці під час збирання, налагодження та експлуатації маніпулятора.

Ключові слова: робот-маніпулятор, 3D-друк, кінематика, програмне керування, інтерфейс користувача.

Abstract

The qualification work is dedicated to the implementation of the Niryo One robotic manipulator using 3D printing technologies. An overview of modern manipulators and an analysis of the structural solutions of the platform are presented. The study examines the hybrid drive system combining stepper motors and servomotors, as well as the use of a Raspberry Pi 3 B+ as the central control module. The work includes the development of the hardware components, the modeling and fabrication of parts, and the testing of the control software with implemented kinematic models and motion planning algorithms. It also provides occupational safety recommendations for the assembly, adjustment, and operation of the manipulator in laboratory conditions.

Keywords: robot manipulator, 3D printing, kinematics, software control, user interface.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів..	6
Вступ.....	7
Розділ 1. Аналітичний огляд роботів-маніпуляторів та технологій 3D-друку	10
1.1. Актуальність та сучасні тенденції розвитку роботів-маніпуляторів	10
1.2. Класифікація роботів-маніпуляторів та їх основні конструктивні особливості	13
1.3. Аналіз конструкції та функціональних можливостей робота Niryo One.....	14
1.4. Технології 3D-друку для створення робототехнічних систем ...	18
Розділ 2. Розробка апаратної частини робота-маніпулятора Niryo One з використанням технології 3D-друку.....	24
2.1. Розробка структурної схеми робота-маніпулятора.....	24
2.2. Вибір та обґрунтування елементної бази.....	26
2.3. Конструювання та моделювання механічних компонентів	29
2.4. Виготовлення деталей методом 3D-друку	32
2.5. Розробка трипальцевого захвата для робота-маніпулятора Niryo One	35
Розділ 3. Розробка програмної частини системи керування роботом-маніпулятором	40
3.1. Архітектура ПЗ та середовище розробки.....	40
3.2. Реалізація моделей кінематики та планування рухів.....	43
3.3. Програмне керування апаратними модулями	46
3.4. Розробка інтерфейсу користувача та тестування програмної системи.....	49
Розділ 4. Охорона праці	54
4.1. Вступ.....	54
4.2. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при роботі з робототехнікою та 3D-обладнанням.....	55

4.3. Безпека роботи з низьковольтними електронними системами та електромеханічними приводами робота-маніпулятора	57
4.4. Заходи безпеки під час збирання, налагодження та експлуатації робота-маніпулятора	58
Висновки	61
Список використаних джерел	62
Додаток А	63
Програмний код для тестування робота-маніпулятора	63

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ**

ROS – Robot Operating System;

FDM – Fused Deposition Modeling;

SLA – Stereolithography;

SLS – Selective Laser Sintering;

SD – Secure Digital;

PWM – Pulse-Width Modulation;

ПЗ – Програмне забезпечення;

ABS – Acrylonitrile Butadiene Styrene;

PETG – Polyethylene Terephthalate Glycol;

					171.6321М.КР.ПЗ.Скорочення	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ВСТУП

Стрімкий розвиток робототехніки, систем автоматизації та інтелектуальних виробничих технологій зумовлює підвищений інтерес до універсальних і доступних роботизованих платформ. Роботи-маніпулятори дедалі частіше використовуються не лише у промисловості, але й у навчальних лабораторіях та дослідницьких центрах. Завдяки швидкому поширенню адитивних технологій стало можливим створення компактних, економічно доступних та конструктивно гнучких роботизованих систем, що дозволяють адаптувати конструкцію під різні задачі. Однією з найперспективніших платформ такого типу є робот-маніпулятор Niryo One, який поєднує відкриту архітектуру, модульність і можливість виготовлення більшості корпусних деталей методом 3D-друку.

Використання адитивного виробництва у сфері робототехніки дає змогу суттєво знизити вартість виготовлення механічних компонентів, прискорити етапи розроблення та забезпечити простоту їх модернізації. Такий підхід особливо цінний у наукових та навчальних середовищах, де швидкість створення та адаптації прототипів є критично важливою. Разом із цим сучасні маніпулятори потребують високої точності позиціонування, плавності рухів і надійності, що досягається завдяки застосуванню гібридних приводних систем, які поєднують крокові двигуни та сервоприводи. Використання одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 3 B+ як центрального керуючого модуля забезпечує можливість реалізації складних алгоритмів кінематики, планування рухів та інтеграції з програмними системами в реальному часі.

Одним із ключових викликів сьогодення є створення доступних роботизованих платформ, які водночас є точними, технологічно простими у виготовленні та гнучкими в конфігурації. Саме тому реалізація програмно-апаратного робота-маніпулятора Niryo One є актуальною інженерною

					171.6321М.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

задачею, що поєднує питання механічного конструювання, електроніки, програмування та експлуатації.

Метою роботи є реалізація робота-маніпулятора Niryo One із використанням технологій 3D-друку, моделювання механічних компонентів та створення програмного забезпечення для керування рухами маніпулятора.

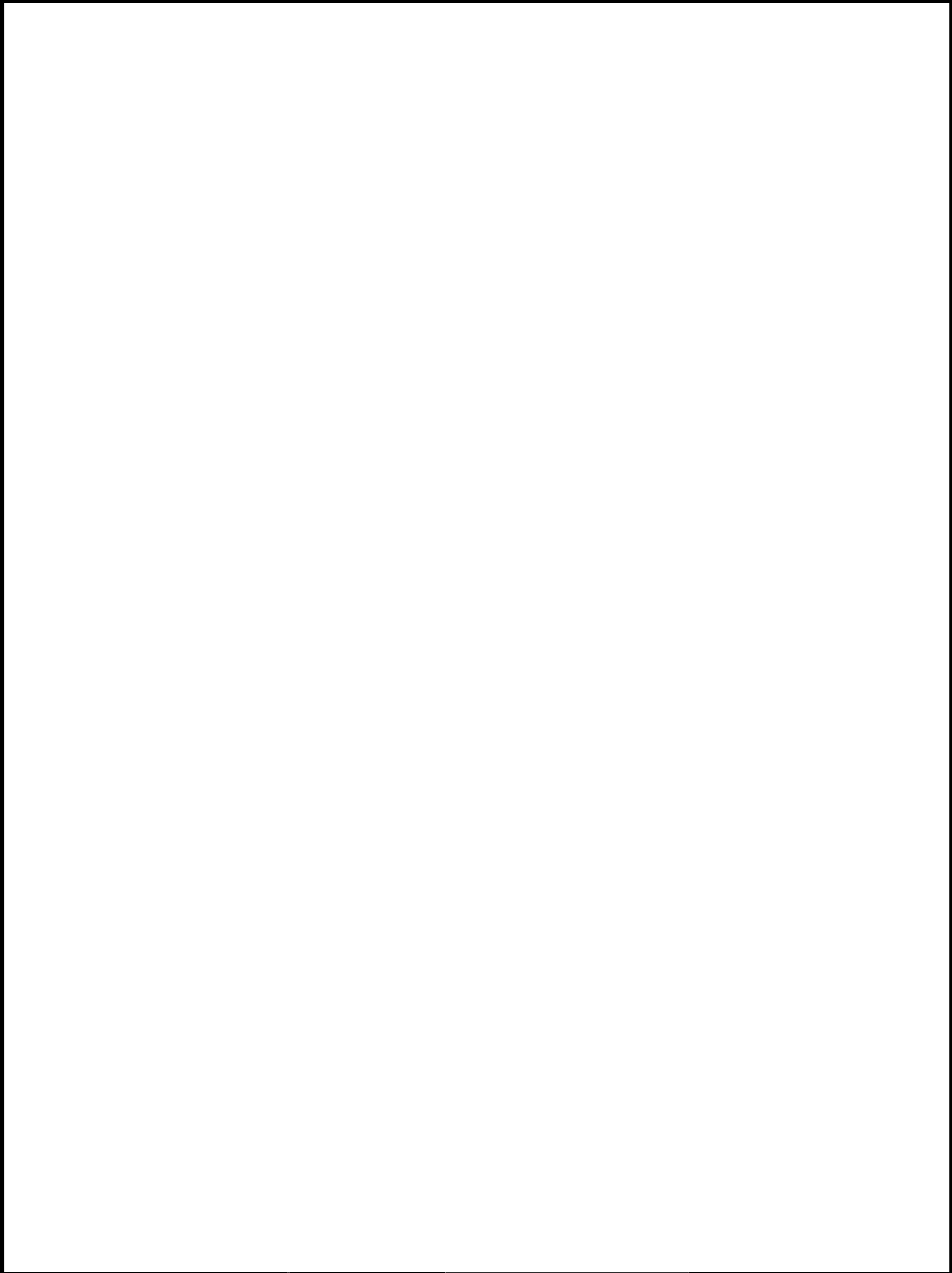
Об'єкт дослідження — роботи малої потужності з модульною конструкцією.

Предмет дослідження — методи розробки апаратних та програмних компонентів маніпулятора Niryo One із використанням технологій 3D-друку.

Практична значимість роботи полягає у створенні доступної навчально-дослідницької платформи, яку можна використовувати для відпрацювання алгоритмів керування, вивчення кінематики, тестування роботоизованих компонентів та виконання лабораторних робіт. Розроблена система може бути застосована в освітніх закладах, наукових лабораторіях і в інженерних проєктах для швидкого прототипування та дослідження механізмів роботів.

Результати роботи доповідалися на Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Автоматика та електротехніка» 20 – 21 листопада 2024 року. Тема доповіді: «Використання роботів-маніпуляторів, виготовлених за допомогою 3D-друку, в освітньому процесі».

					171.6321М.КР.ПЗ.Вступ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.6321М.КР.ПЗ.Р1				
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Аналітичний огляд роботів-маніпуляторів та технологій 3D-друку	Літ.		Арк.	Аркуші
Розробник		Трешнюк А. І.							
Консультант								9	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова			
Керівник		Дьяконов О. С.							
Зав. каф.		Рябенський В. М.							

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД РОБОТІВ-МАНІПУЛЯТОРІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ 3D-ДРУКУ

1.1. Актуальність та сучасні тенденції розвитку роботів-маніпуляторів

Стрімкий розвиток індустрії та зростання потреби у високотехнологічних рішеннях зумовлюють постійне збільшення попиту на роботизовані системи. Роботи-маніпулятори посідають особливе місце у сучасній інженерії, оскільки вони здатні виконувати широкий спектр операцій з високою точністю, продуктивністю та повторюваністю.

Важливим чинником актуальності роботів-маніпуляторів є потреба у підвищенні ефективності виробництва. Сучасні підприємства стикаються з викликами, пов'язаними зі зростанням обсягів продукції, необхідністю зменшення браку та забезпечення стабільності технологічних процесів. Роботизовані системи дозволяють забезпечити гнучкість виробництва та швидко налаштовувати обладнання під різні типи продукції. На відміну від традиційних механізмів, маніпулятори з числом ступенів свободи від чотирьох до шести здатні ефективно імітувати рухи людської руки, що робить їх універсальним інструментом для широкого спектра задач.

Не менш важливою тенденцією розвитку роботів-маніпуляторів є перехід від масивних промислових систем до компактних, адаптивних та доступних роботів, які можна легко інтегрувати у невеликі лабораторії та навчальні центри. Разом із тим, швидко зростає сегмент колаборативних роботів (рис.1.1), які здатні працювати спільно з людиною без необхідності відокремлення робочої зони. Їхня популярність пояснюється високою безпекою, програмованістю та відносно низькими витратами на впровадження. Універсальність та доступність таких систем сприяє тому, що все більше закладів освіти інтегрують роботів-маніпуляторів у навчальний процес, формуючи у студентів практичні навички роботи з сучасними інженерними технологіями.

					171.6321М.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Колаборативний робот KUKA

Значну роль у сучасному розвитку робототехніки відіграють адитивні технології, особливо 3D-друк. Адитивне виготовлення деталей дозволяє створювати конструктивно складні елементи, зменшувати вагу механізмів, оптимізувати структуру компонентів та швидко отримувати прототипи. У контексті створення роботів-маніпуляторів це відкриває шлях до гнучкого моделювання, модернізації деталей та відтворення складних механізмів навіть у домашніх чи лабораторних умовах.

Робот Niryo One (рис. 1.2) частково виготовляється методом 3D-друку. Він складається з сервоприводів, крокових двигунів, датчиків та мікрокомп'ютера Raspberry Pi 3 B+ з відкритою архітектурою програмного забезпечення.



Рисунок 1.2 – Робот-маніпулятор Niryo One

Сучасні маніпулятори інтегрують алгоритми кінематики, динаміки, оптимального керування та планування траєкторій, що дозволяє виконувати

					171.6321M.KP.ПЗ.P1	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

складні рухи з врахуванням навантажень, обмежень по швидкості та уникнення зіткнень. Стрімкий розвиток таких платформ, як Robot Operating System (ROS), сприяє популяризації відкритих інструментів і програмних бібліотек, що можуть використовуватися як у промислових, так і у навчальних проєктах.

Ще одним важливим напрямом є інтеграція роботів-маніпуляторів із технологіями штучного інтелекту, комп'ютерного зору та машинного навчання. Сучасні системи здатні виконувати складні операції, орієнтуючись не лише на попередньо визначені координати, а й на обробку інформації із камер та сенсорів. Такий підхід забезпечує роботам можливість адаптуватися до непередбачуваних ситуацій, що особливо важливо у сервісній робототехніці, маніпуляціях з об'єктами, хірургії та наукових дослідженнях.

Застосування роботів-маніпуляторів, створених за допомогою 3D-друку, дозволяє поєднати теоретичні знання з практичними навичками моделювання, друку, збирання, налагодження та керування роботизованими системами. Ця тенденція була висвітлена також у межах моєї участі у Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих учених, де було представлено результати досліджень щодо ефективності використання 3D-друкованих роботів у навчальному процесі.

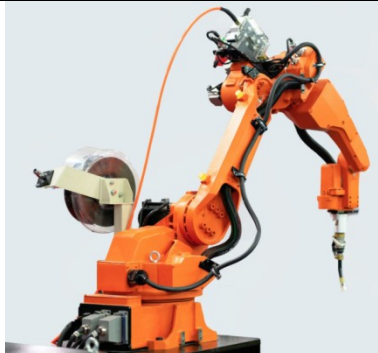
Сучасний етап розвитку роботів-маніпуляторів характеризується інтеграцією декількох технологічних напрямів: цифрового виробництва, електроніки, інтелектуальних систем керування, адитивних технологій та машинного навчання. Сукупність цих тенденцій формує сприятливі умови для створення нових роботизованих систем, які будуть доступними, гнучкими та ефективними. З огляду на це, дослідження, спрямоване на розробку маніпулятора на основі 3D-друку, є актуальним як у науковому, так і у практичному вимірах, адже воно сприяє подальшому розвитку технологій автоматизації та вдосконаленню підготовки інженерних кадрів.

					171.6321M.KP.ПЗ.P1	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1.2. Класифікація роботів-маніпуляторів та їх основні конструктивні особливості

Роботи-маніпулятори посідають ключове місце серед сучасних робототехнічних систем завдяки своїй універсальності, здатності відтворювати складні траєкторії руху та виконувати широкий спектр технологічних операцій. Їх класифікація ґрунтується на кінематичній структурі, конфігурації робочого простору, типі приводів, а також функціональному призначенні.

Таблиця 1.1 – Класифікація за функціональним призначенням

Призначення	Основні завдання та функції	Приклади використання	Зображення
Промислові	Виконання рутинних, повторюваних завдань на виробництві	Зварювання, фарбування, складання електроніки, пакування, обслуговування верстатів	
Логістичні та складські	Швидке переміщення об'єктів	Сортувальні центри, пакування товарів	
Медичні	Виконання складних мікрохірургічних операцій	Кардіохірургія, нейрохірургія	

Військові	Розмінування, знешкодження вибухових пристроїв, розвідка небезпечних зон	Армія, служби порятунку	
Дослідницькі та навчальні	Навчання студентів кінематиці, програмуванню та робототехніці	Заклади освіти	

Класифікація за кінематичною структурою:

- Послідовні маніпулятори

Характеризуються послідовним з'єднанням ланок, що забезпечує значний робочий простір і гнучкість рухів. Недоліком є накопичення похибок у кожному наступному ступені свободи. Найпоширеніший тип у промисловій автоматизації.

- Паралельні маніпулятори

Мають декілька паралельних кінематичних ланцюгів, що працюють одночасно. Такі системи забезпечують високу жорсткість, підвищену точність і швидкодію, однак мають обмежений робочий об'єм та складні алгоритми керування.

- Гібридні маніпулятори

Поєднують елементи серіальних і паралельних структур, що дозволяє оптимізувати співвідношення між робочим простором, точністю та навантажувальною здатністю.

1.3. Аналіз конструкції та функціональних можливостей робота Niryo One

					171.6321M.KP.ПЗ.Р1	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Маніпулятор Niryo One (рис. 1.3) створений як освітня, дослідницька та експериментальна платформа, що поєднує в собі компактну механіку, модульну конструкцію, можливість 3D-друку деталей і програмованість. Його архітектура спроектована таким чином, щоб відтворювати основні принципи роботи промислових роботів.

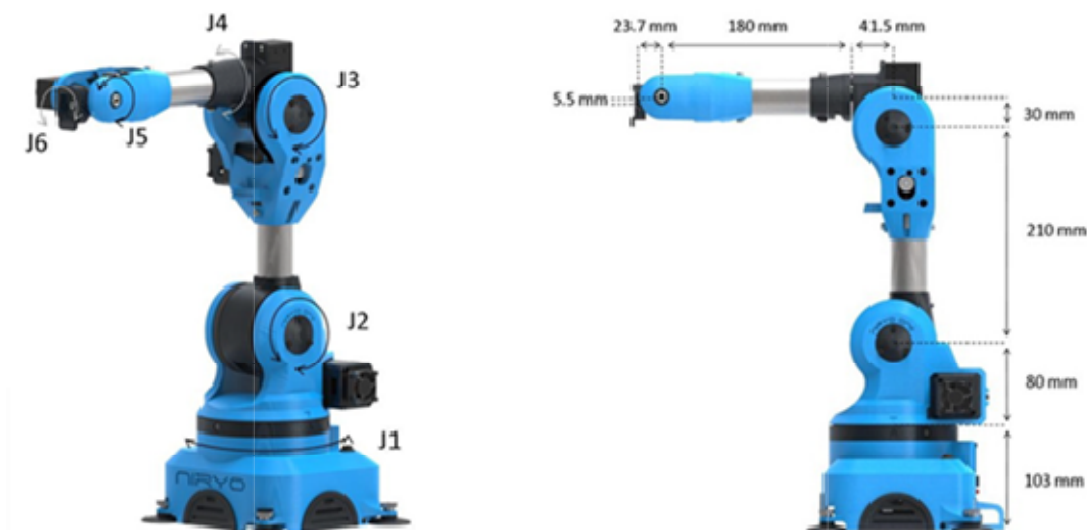


Рисунок 1.3 – Ступені свободи та розміри робота-маніпулятора Niryo One

Niryo One має шестиступеневий кінематичний ланцюг (J1-J6), що дозволяє маніпулятору здійснювати обертальні та поступальні рухи, забезпечуючи достатню гнучкість для позиціювання у тривимірному просторі та орієнтації кінцевого ефектора під різним кутом. Така конструкція наближена до структури людської руки.

За типовими характеристиками, робот має робочий радіус до 440 мм, що дає йому досить великий простір дій для настільних задач або лабораторних експериментів. Максимальне навантаження близько 0,3 кг, що відповідає задачам маніпуляції, сортування дрібних деталей, складання легких елементів, а також виконанню освітніх і демонстраційних сценаріїв. Повторюваність позиціювання становить приблизно ± 1 мм, що хоча й не дає рівня промислових роботів, проте достатньо для освітніх, дослідницьких

					171.6321M.KP.ПЗ.P1	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

задач або прототипування. Вага всієї системи 3.3 кг, що робить її відносно легкою й мобільною.

Конструкція корпусу маніпулятора складається з модулів, які виготовлені методом 3D-друку, що дозволяє легко модифікувати, замінювати або адаптувати окремі елементи конструкції під конкретні потреби проєкту. При цьому для вузлів, де потрібна підвищена жорсткість або менша деформація, можуть застосовуватись металеві або посилені деталі. Така комбінація матеріалів і технологій забезпечує баланс між гнучкістю, вагою та міцністю.

Привідна система Niryo One побудована на комбінації крокових двигунів і сервоприводів. Зокрема, у складі системи «розумні» мотор-модулі (Smart steppers NEMA 17) та сервоприводи (Dynamixel), які зображені на рисунку 1.4. Вони забезпечують точність та контроль рухів. Така гібридна схема дає змогу більш точно керувати суглобами, здійснювати плавні обертання та адаптуватися під різноманітні навантаження.



Рисунок 1.4 – Кроковий двигун NEMA 17 та сервопривід DYNAMIXEL XL430

					171.6321M.KP.ПЗ.Р1	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Центральним елементом керування є одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 3 B+ (рис.1.5), який виконує такі функції:

- опрацювання команд користувача та високорівневих алгоритмів;
- обчислення кінематики й планування рухів;
- керування драйверами крокових двигунів та сервоприводами;
- взаємодія з датчиками та периферійними модулями.



Рисунок 1.5 – комп'ютер Raspberry Pi 3 B+

Raspberry Pi 3 B+ працює під керуванням Linux, що відкриває можливість інтеграції з бібліотеками Python, інструментами комп'ютерного зору, неймережевими фреймворками та іншими сучасними цифровими технологіями.

Особливістю програмної архітектури робота є підтримка середовища ROS. Це дозволяє реалізовувати стандартні для робототехніки модулі: планування траєкторій, симуляцію, зворотну кінематику, роботу з датчиками, а також легко інтегрувати зовнішні програмні засоби або розширювати функціональність через власні ROS-вузли.

Базова конфігурація Niryo One включає механічний захват, однак принцип побудови конструкції є модульним, що дає можливість швидко

					171.6321M.KP.ПЗ.Р1	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

змінювати інструмент. Серед альтернативних інструментів можуть застосовуватись, вакуумні присоски, електромагнітні захоплювачі, спеціалізовані маніпуляційні інструменти.

До ключових можливостей Niryo One належать:

- автоматизоване виконання послідовних маніпуляційних операцій;
- навчання рухів у режимі ручного переміщення ("learning mode");
- реалізація алгоритмів обробки зображень за допомогою підключених камер;
- підтримка програмування рухів через Python, ROS або графічні інтерфейси.

Основні недоліки робота-маніпулятора Niryo One:

- максимальне навантаження близько 0,3 кг, що не дозволяє використовувати його для задач високої механічної навантаженості;
- точність повторюваності близько ± 1 мм, що є достатнім для навчальних цілей, але недостатнім для високоточних промислових застосувань;
- знижена жорсткість 3D-друкованих деталей, що обмежує довговічність механічної частини при високих навантаженнях.

1.4. Технології 3D-друку для створення робототехнічних систем

Сучасні технології адитивного виробництва посідають важливе місце у розробленні роботизованих систем, оскільки забезпечують швидке виготовлення індивідуалізованих компонентів, зниження ваги конструкцій та можливість створення форм, недоступних для традиційних методів механічної обробки. 3D-друк став ключовим інструментом прототипування у сфері роботобудування, дозволяючи інженерам оперативно тестувати нові конструкції, виготовляти нестандартні кріплення, корпуси, елементи

					171.6321M.KP.ПЗ.Р1	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

передачі, адаптери, маніпулятори та елементи футуристичних механізмів, без необхідності залучення зовнішнього виробництва.

У робототехніці зазвичай використовуються такі технології 3D-друку: FDM-друк (Fused Deposition Modeling), SLA/LCD-друк (Stereolithography) та SLS-друк (Selective Laser Sintering). Кожна з цих технологій має свої переваги й обмеження, що визначають сфери їхнього застосування.

Технологія FDM (рис. 1.6) є найбільш поширеною завдяки доступності обладнання, широкому вибору матеріалів та простоті обслуговування. Вона передбачає послідовне нанесення розплавленого полімерного волокна шарами, що згодом формують готову деталь. У робототехнічних системах FDM-друк найчастіше застосовується для створення корпусних елементів, каркасів, зовнішніх захисних панелей, прототипів маніпуляторів, а також різноманітних адаптерів. Матеріали PLA, PETG та ABS використовуються для створення легких конструкцій, а інженерні пластики, такі як Nylon, PC чи композити з вуглецевим волокном, забезпечують підвищену механічну міцність та жорсткість, необхідну для робототехнічних вузлів, які зазнають навантажень.

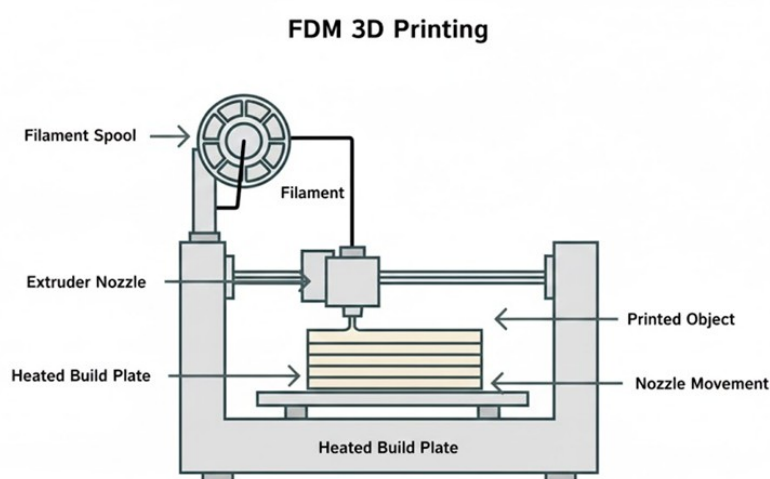


Рисунок 1.6 – Технологія FDM-друку

Технологія SLA/LCD-друку (рис. 1.7), яка ґрунтується на полімеризації фоточутливих смол під дією ультрафіолетового випромінювання, дозволяє

					171.6321M.KP.ПЗ.Р1	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		19

досягати високої точності та гладкості поверхні. Вона застосовується у випадках, коли робототехнічна система потребує друку складних дрібних деталей, прецизійних механізмів або елементів, що взаємодіють із датчиками. Завдяки високому рівню деталізації такі методи незамінні при створенні малогабаритних механізмів, гнучких шарнірних з'єднань, корпусів сенсорів та декоративних елементів. Водночас SLA-деталі зазвичай поступаються FDM-пластикам у довговічності та опорі на ударні навантаження, що потребує зваженого підходу до їх вибору.

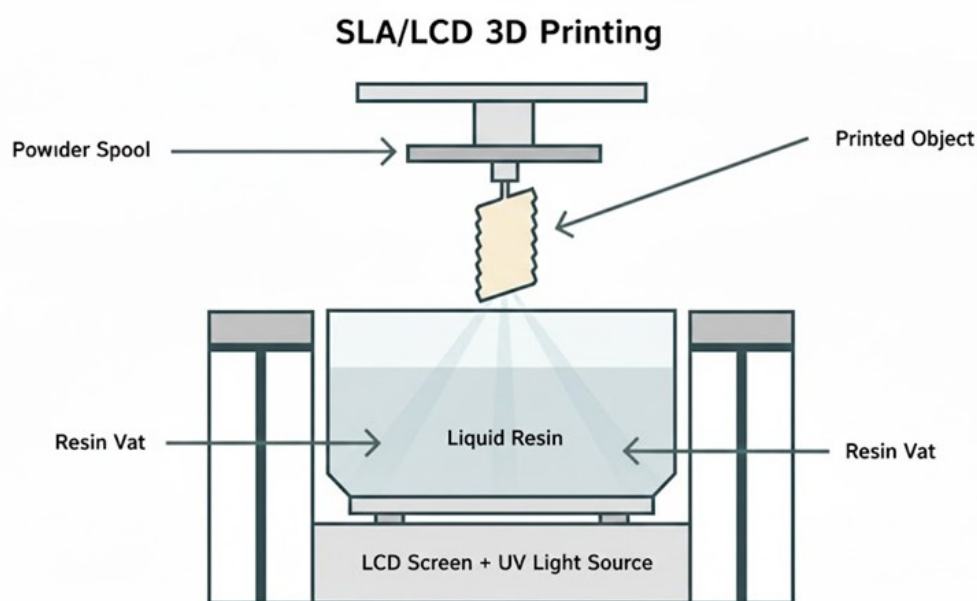


Рисунок 1.7 – Технологія SLA/LCD-друку

Для деталей, що потребують підвищеної міцності та зносостійкості, застосовується SLS-друк, який працює на основі лазерного спікання полімерного порошку. Деталі, створені за цією технологією, характеризуються високою структурною міцністю, відсутністю підтримок і можливістю формування складних механічних компонентів. У робототехнічних системах SLS-друк використовується для виготовлення механічних вузлів, шарнірів, елементів редукторів, важелів і конструкцій, що

повинні витримувати динамічні навантаження або працювати в умовах підвищеної температури.

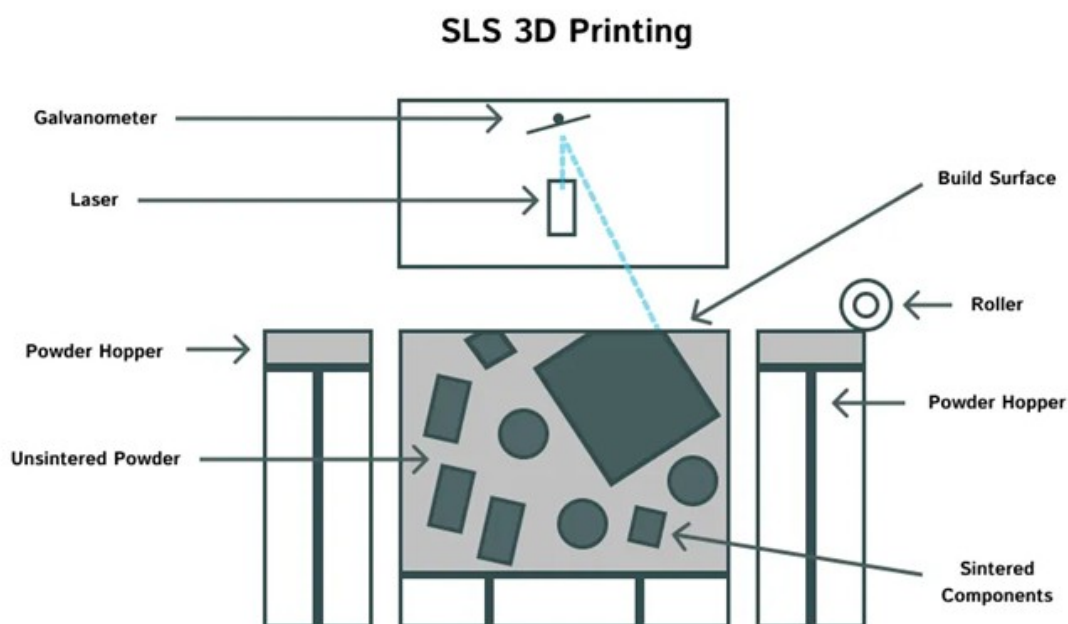


Рисунок 1.8 – Технологія SLS-друку

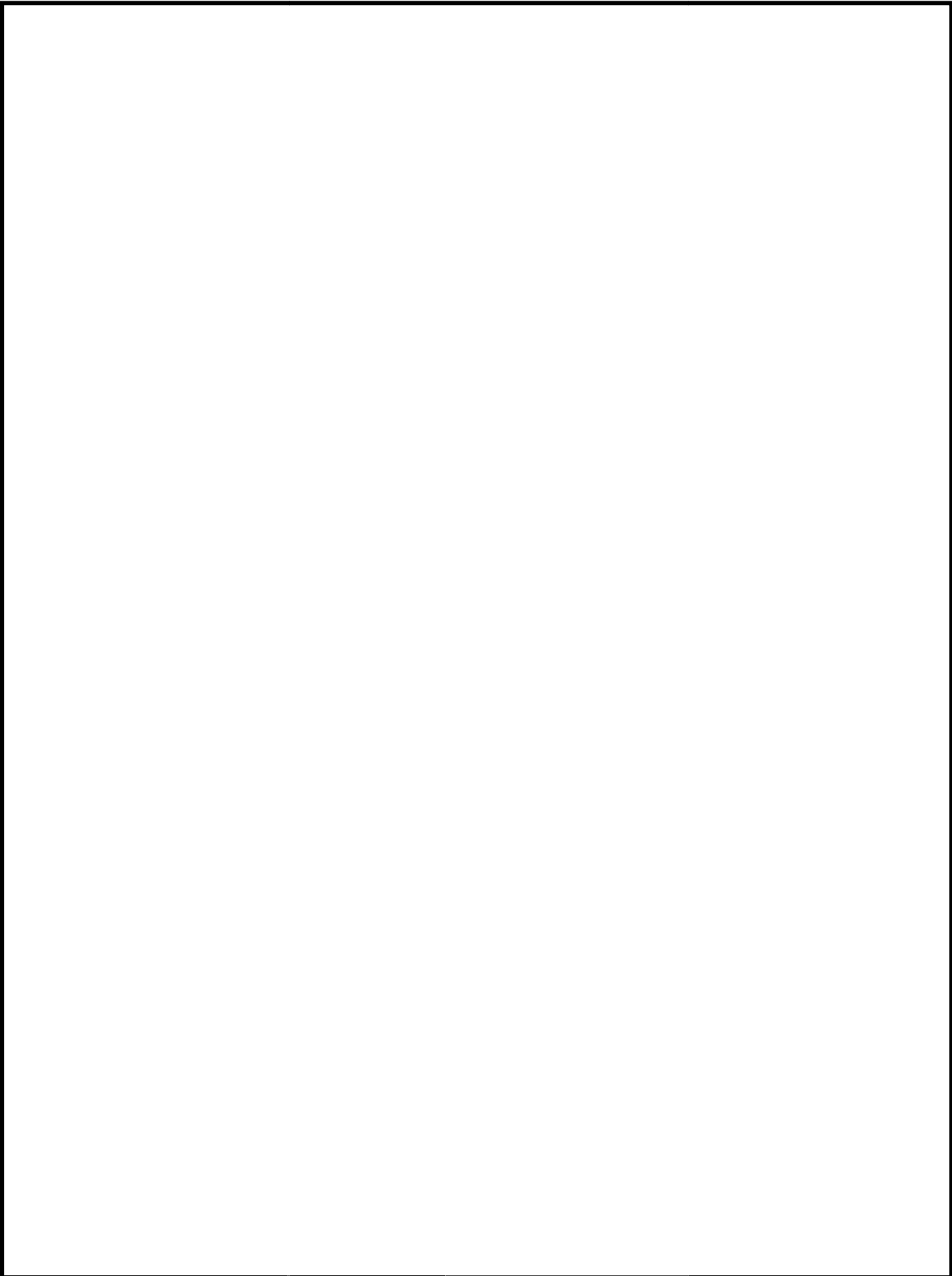
Окрему роль відіграють композиційні матеріали, які використовуються в поєднанні з FDM-технологією. Вуглецеве або скловолоконне армування пластика дозволяє отримувати деталі з високою жорсткістю та низькою вагою, що є критично важливим для мобільних робототехнічних систем та маніпуляторів, де зайва маса збільшує навантаження на приводи і зменшує ефективність конструкції.

Таким чином, технології адитивного виробництва є важливим інструментом сучасної робототехнічної інженерії, який значно скорочує час розроблення, зменшує фінансові витрати, полегшує індивідуальне проєктування та забезпечує створення легких, функціональних і технологічно оптимізованих компонентів. Використання 3D-друку сприяє підвищенню ефективності робототехнічних систем і відіграє ключову роль у швидкому впровадженні нових інженерних рішень.

Висновки до розділу

Промислові маніпулятори демонструють високу точність та жорсткість конструкції, проте їхня вартість і складність обслуговування роблять їх малопридатними для освітніх та прототипувальних цілей. Навчальні роботизовані системи, до яких належить Niryо One, забезпечують доступність, модульність та простоту модифікації, проте їх функціональні можливості обмежуються використанням легких матеріалів та невисокою вантажопідйомністю. Робот-маніпулятор Niryо One поєднує низку переваг сучасних навчальних маніпуляторів: відкриту програмну архітектуру, використання поширених приводів, можливість відтворення складних траєкторій, а також широке застосування 3D-друку для конструктивних елементів.

					171.6321М.КР.ПЗ.Р1	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.6321М.КР.ПЗ.Р2			
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Розробка апаратної частини робота-маніпулятора Niryo One з використанням технології 3D-друку	Літ.	Арк.	Аркуші
Розробник		Трешнюк А. І.						
Консультант							23	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Дьяконов О. С.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА NIRYO ONE З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ

2.1. Розробка структурної схеми робота-маніпулятора

Структурна схема робота-маніпулятора (рис. 2.1) є основою для подальшого конструювання та моделювання механічних компонентів. Вона відображає функціональну організацію системи, визначає взаємозв'язки між її підсистемами та дозволяє здійснювати планування послідовності конструкторських рішень. В основі схеми лежить модульний підхід, який передбачає розподіл системи на функціональні блоки: механічну структуру, підсистему приводів, обчислювальний модуль, комунікаційну інфраструктуру та підсистему взаємодії з користувачем.

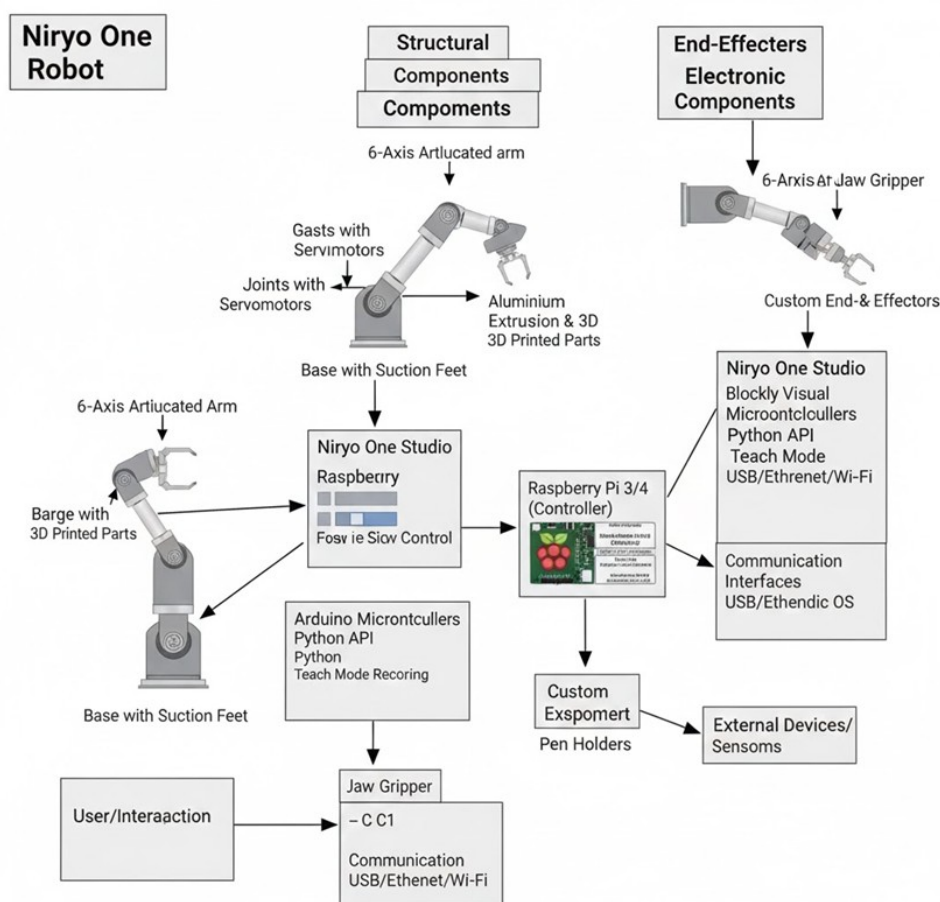


Рисунок 2.1 – Структурна схема робота-маніпулятора Niryo One

Механічна структура маніпулятора формується шістьма ланками та відповідною кількістю обертальних з'єднань, що утворюють шість ступенів свободи. Конструктивні елементи, зокрема основа, корпуси приводів та елементи суглобів, виготовлені методом 3D-друку (ABS і PETG) та виконують несучу функцію для привідних модулів. У цих елементах інтегровані місця кріплення для крокових двигунів NEMA17 та сервоприводів Dynamixel, що забезпечує точне взаємне розташування та передачу моменту.

Підсистема приводів включає:

- крокові двигуни NEMA17, які забезпечують обертальний рух у базових осях;
- сервоприводи Dynamixel (моделі XL-430 та XL-320) для високоточних рухів у кінцевих ланках;
- драйвери крокових двигунів (вибір яких буде здійснено в подальших підрозділах) для перетворення управляючих сигналів Raspberry Pi у сигнали збудження обмоток.

Сигнали керування від обчислювального блоку надходять до контролерів приводів через інтерфейси UART, PWM та цифрові виходи Raspberry Pi. Обчислювальний модуль, представлений одноплатним комп'ютером Raspberry Pi 3B+, виконує функції:

- формування управляючих сигналів для усіх приводів;
- виконання алгоритмів прямої та зворотної кінематики;
- управління рухом за заздалегідь визначеними траєкторіями;
- забезпечення оброблення команд користувача через локальну або мережеву взаємодію.

На Raspberry Pi розгортається операційне середовище Linux та програмні пакети, необхідні для роботи системи керування, включаючи драйвери, бібліотеки та користувацькі програми.

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Комунікаційна підсистема забезпечує обмін даними між апаратними модулями та зовнішніми пристроями:

- USB-інтерфейси для підключення зовнішніх модулів;
- Ethernet/Wi-Fi для мережевої взаємодії та дистанційного керування;
- I²C/SPI/UART для внутрішнього обміну між Raspberry Pi та модулями драйверів або сенсорів.

Підсистема кінцевих ефекторів представлена механічним захоплювачем, керування яким здійснюється окремим сервоприводом. Конструкція дозволяє швидко змінювати кінцевих ефекторів у разі додавання вакуумного модуля, магнітного тримача чи адаптивного грипера.

Підсистема взаємодії з користувачем включає програмний інтерфейс керування, що забезпечує:

- ручне управління позиціями маніпулятора;
- запис та відтворення послідовностей рухів;
- налаштування параметрів приводів;
- доступ до діагностичної інформації.

Таким чином, структурна схема робота-маніпулятора відображає зв'язність і взаємодію всіх компонентів – від механічних вузлів до алгоритмічного рівня керування. Така побудова системи забезпечує можливість масштабування, модифікації та адаптації апаратних і програмних модулів.

2.2. Вибір та обґрунтування елементної бази

Проектування апаратної частини робототехнічного маніпулятора вимагає ретельного добору елементної бази, яка має забезпечити необхідні експлуатаційні характеристики: точність позиціонування, плавність рухів, відмовостійкість, сумісність із системою керування та можливість подальшої модернізації.

1) Електромеханічні приводи

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

У конструкції маніпулятора для приводів нижніх ступенів застосовуються крокові двигуни NEMA 17. Вони забезпечують необхідний крутний момент та високу точність позиціонування для роботи з відносно великими механічними навантаженнями.

Для приводів кінцевих ланок обрані інтелектуальні сервоприводи серії Dynamixel. Їх використання обґрунтовано необхідністю поєднання компактності, вбудованої електроніки та високої точності керування положенням і швидкістю. Цифрове позиціонування забезпечує високу точність та повторюваність рухів. Наявність вбудованого зворотного зв'язку щодо положення, температури та струму, що є необхідним для реалізації замкнутого контуру керування. Dynamixel XL-430 застосовуються для зап'ястного суглоба та обертання інструментального фланця. Dynamixel XL-320 використовується для управління кінцевим ефектором. Таке поєднання забезпечує плавне та високоточне позиціонування у верхніх ступенях, де критичною є маневровість, а навантаження є значно меншими.

2) Обчислювальний та керуючий модуль

Центральним обчислювальним модулем обрано Raspberry Pi 3 B+, який зображений на рисунку 2.2. Він виконує функції формування управляючих сигналів, оброблення алгоритмів зворотної кінематики та забезпечення комунікацій.

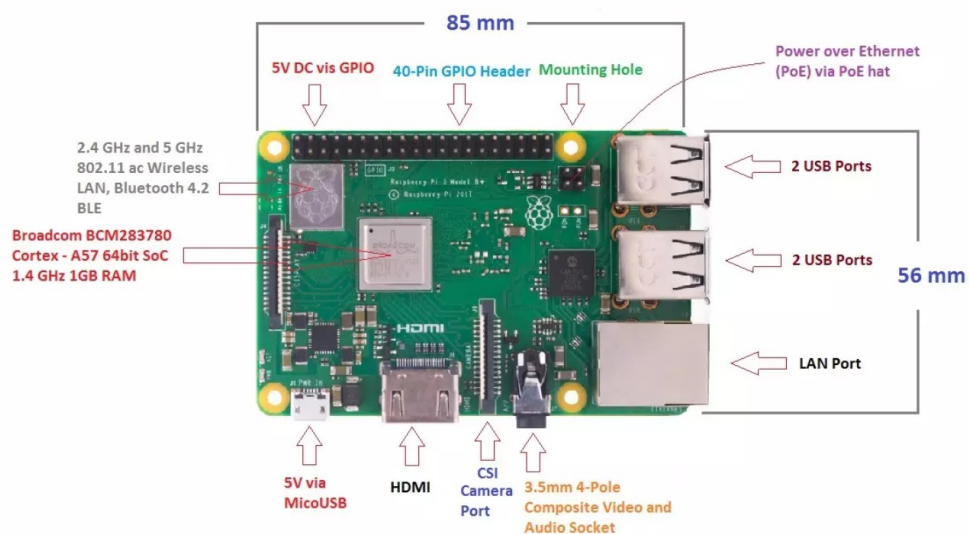


Рисунок 2.2 – Raspberry Pi 3 B+

					171.6321M.KP.ПЗ.Р2	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		27

Обґрунтування вибору:

- Обчислювальна потужність достатня для виконання задач керування в режимі реального часу (RTM) та обробки кінематичних розрахунків.
- Повна підтримка операційної системи Linux та мови програмування Python є стандартом у робототехніці.
- Наявність вбудованих інтерфейсів (GPIO, UART, I²C, SPI, USB, Ethernet, Wi-Fi) для підключення периферії та забезпечення мережевої взаємодії.
- Підтримка ROS-пакетів та бібліотек для роботи з сервоприводами Dynamixel.
- Використання Raspberry Pi 3 B+ дозволяє реалізувати відкриту архітектуру та забезпечити гнучкість у розробці програмного забезпечення.

3) Допоміжні системи та конструктивні елементи

Живлення маніпулятора здійснюється від зовнішнього джерела постійного струму з вихідною напругою 12 В.

Для забезпечення надійного обміну даними та передачі потужності застосовуються кабельні джгути для бази, ліктя та зап'ястя, а також гнучкі кабелі для внутрішніх з'єднань. Кабельна система розроблена з урахуванням рухомих з'єднань та потреби запобігання перегинанню проводів у шарнірах.

4) Конструктивні елементи 3D-друку

Усі корпусні частини, кришки, опори та сегменти маніпулятора надруковані методом FDM-друку на принтері Creality K1-Max.

Використані матеріали:

- ABS: Для відповідальних деталей, де необхідна підвищена жорсткість та стійкість до температури.

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- PETG: Для елементів зі складною геометрією та підвищеною ударною міцністю.

Обрана елементна база повністю відповідає технічним вимогам до навчально-дослідницького робота-маніпулятора. Комбінація крокових двигунів NEMA 17, сервоприводів Dynamixel та обчислювальної платформи Raspberry Pi забезпечує необхідну точність, високу керованість і можливість подальшої модернізації системи. Використання 3D-друкованих елементів знижує масу конструкції та спрощує адаптацію до індивідуальних потреб.

2.3. Конструювання та моделювання механічних компонентів

Конструювання та моделювання механічних компонентів роботизованого маніпулятора Niryo One є одним із ключових етапів його розробки, оскільки саме механічна структура визначає кінематичні можливості, точність позиціонування, навантажувальну здатність та стійкість системи. На цьому етапі здійснено повний цикл проєктування: від формування вимог до геометрії та міцності деталей до створення тривимірних моделей та їх подальшої перевірки засобами комп'ютерного моделювання.

Основні вимоги до механічних елементів маніпулятора були сформовані з урахуванням:

- забезпечення шести ступенів свободи;
- сумісності із застосованими електромеханічними приводами (кроковими та сервоприводами серії NEMA17, XL-430 та XL-320);
- можливості виготовлення всіх корпусних деталей методом FDM 3D-друку;
- забезпечення мінімальної маси ланок при збереженні достатньої жорсткості;
- можливості швидкої заміни окремих компонентів;
- мінімізації люфтів у шарнірних з'єднаннях;

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

- підтримки естетичного вигляду і функціональної ергономіки.

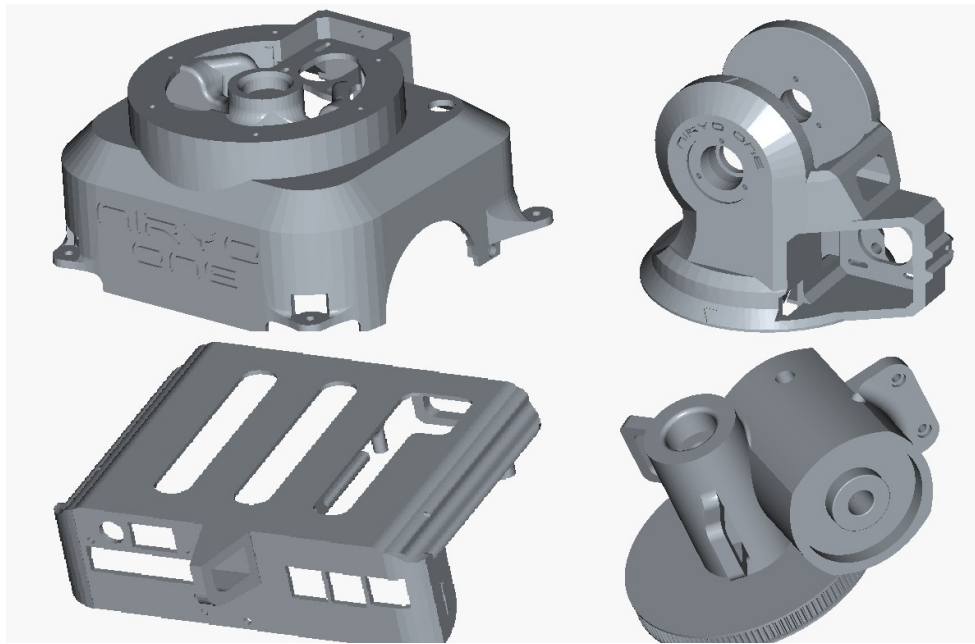


Рисунок 2.3 – Тривимірне моделювання у середовищі FreeCAD

Тривимірне моделювання проводилося у середовищі FreeCAD (рис.2.3), що дозволило сформувати повний комплект цифрової конструкторської документації. У процесі моделювання було створено:

- базовий модуль маніпулятора;
- плечову секцію;
- ліктьовий сегмент;
- зап'ястний вузол з поворотними приводами;
- корпуси для сервоприводів XL-серії;
- адаптери для встановлення крокових двигунів NEMA17;
- грипери та елементи кріплення;
- внутрішні канали для кабельної розводки;
- вентиляційні отвори та посадкові місця для вентилятора 12В.

Особливу увагу приділено оптимізації геометрії деталей під вимоги FDM-друку. Зокрема, поверхні, що потребують високої точності, були розміщені таким чином, щоб зменшити кількість підтримок (рис. 2.4);

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		30

критичні зони були посилені ребрами жорсткості; а отвори під підшипники та вали оброблялися з урахуванням усадки матеріалу.

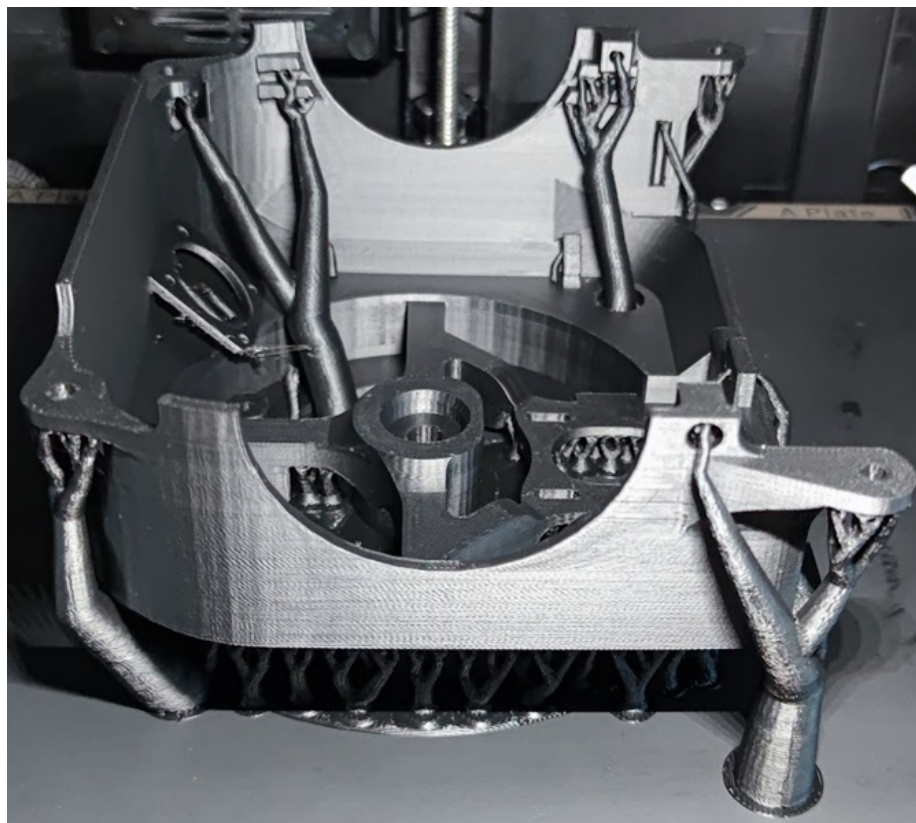


Рисунок 2.3 – Оптимізація розміщення підтримок частини основи робота-маніпулятора

Для оцінювання міцності конструкції виконано низку тестів. Перевірялися наступні критерії:

- прогини під максимальним навантаженням 0,5 кг (згідно зі специфікацією Niryu One);
- стійкість посадкових місць приводів;
- можливість резонансних коливань у рухомих ланках.

Результати показали, що застосовані матеріали та обрана конструктивна схема забезпечують необхідні запаси міцності й демонструють достатню жорсткість для коректного виконання маніпуляцій.

У процесі конструювання та моделювання механічних компонентів маніпулятора було сформовано повну цифрову модель системи,

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

оптимізовану для подальшого виготовлення методом 3D-друку. Запропонована конструкція відповідає вимогам щодо точності, міцності та функціональної модульності, забезпечує сумісність із вибраними приводами та електронними компонентами й дозволяє реалізувати широкий спектр рухів для виконання навчальних та дослідницьких задач.

2.4. Виготовлення деталей методом 3D-друку

У рамках реалізації апаратної частини робота-маніпулятора було здійснено виготовлення конструктивних елементів із застосуванням адитивних технологій. Для цих цілей використовувався 3D-принтер Creality K1 Max, який забезпечує високу точність формоутворення, стабільність технологічних параметрів та можливість відтворення складної геометрії деталей без значної обробки. У виготовленні конструктивних компонентів застосовувалися матеріали ABS та PETG, вибір яких був зумовлений їх механічними та термічними характеристиками. Матеріал ABS характеризується підвищеною ударною міцністю, стійкістю до температурних коливань та здатністю витримувати динамічні навантаження, що робить його придатним для елементів, які працюють у зонах механічної напруги. Натомість PETG відзначається високою адгезією між шарами, відсутністю крихкості та значною стійкістю до деформацій, що обумовлює доцільність його використання для деталей, які вимагають підвищеної гнучкості та стабільності форми.

Процес виготовлення конструктивних елементів складався з основних етапів:

- Адаптація 3D-моделей до вимог технології FDM-друку.

Зокрема, проведено аналіз товщини стінок, структури внутрішніх каналів та відповідності габаритів посадковим місцям для двигунів, підшипників і кабельних каналів. За потреби передбачалося локальне підсилення елементів, що піддаються підвищеним навантаженням.

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

- Генерація G-коду (рис. 2.4) здійснювалася у програмі Creality Print із застосуванням параметрів, оптимізованих окремо для ABS та PETG. Основні параметри друку:

- висота шару: 0,16–0,20 мм;
- заповнення: 30–40 %;
- температура сопла:
 - PETG: 235–245 °C;
 - ABS: 245–255 °C;
- температура платформи:
 - PETG: 75–85 °C;
 - ABS: 95–110 °C;

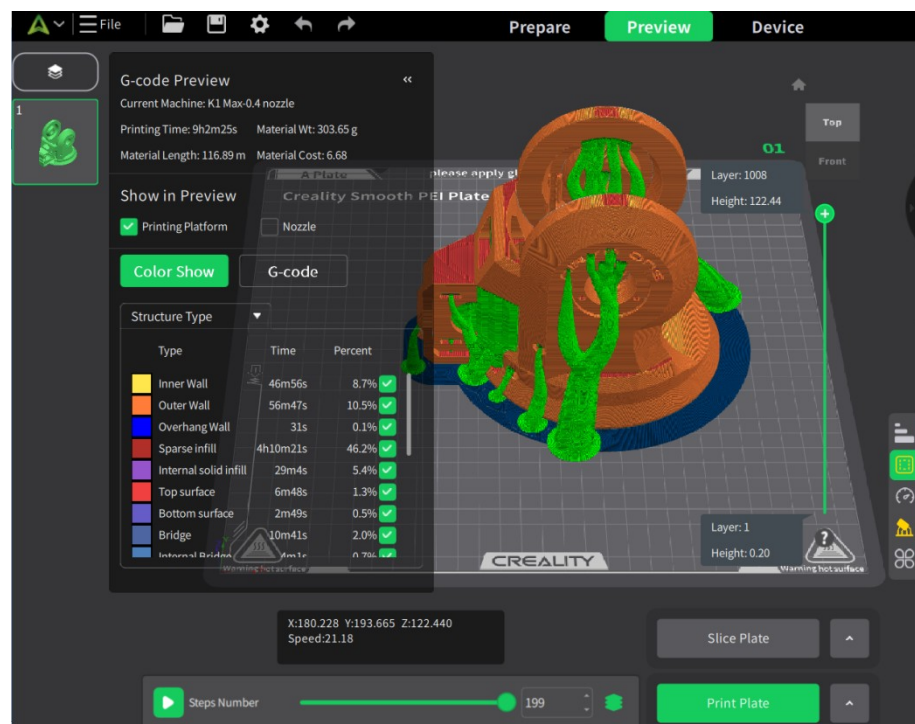


Рисунок 2.4 – Підготовка моделі до 3D-друку

- Друк у закритій камері 3D-принтера Creality K1 Max забезпечив стабільність температурного режиму, що є критично важливим для друку з ABS (рис. 2.5), оскільки цей матеріал схильний до короблення при охолодженні. Процес друку PETG характеризувався

високою рівномірністю нанесення шарів, що дозволило отримати деталі з якісною міжшаровою адгезією.

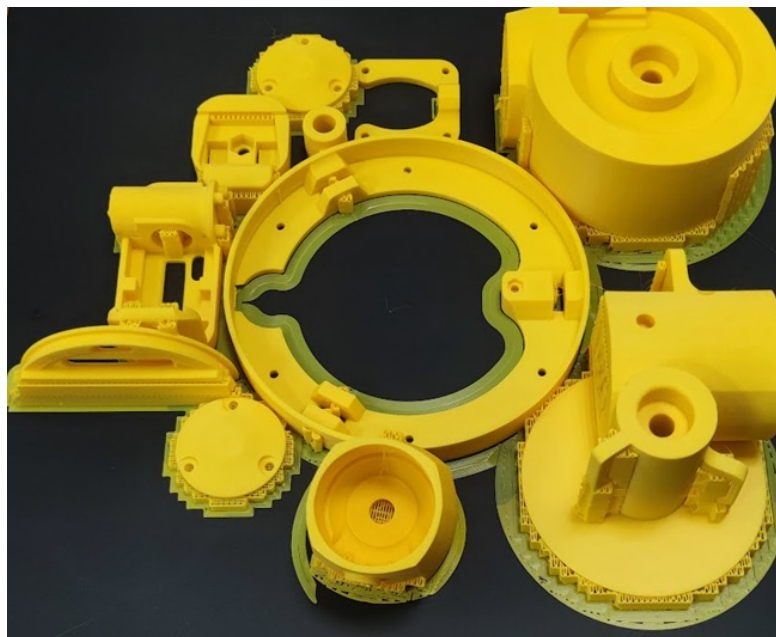


Рисунок 2.5 – 3D-друк компонентів пластиком ABS

Обробка надрукованих деталей: видалення підтримувальних структур та шліфування стикувальних поверхонь (рис. 2.6). У випадку деталей, виготовлених з ABS, за необхідності застосовувалася легка поверхнева обробка ізопропіловим спиртом та ацетоном з метою зменшення шорсткості.

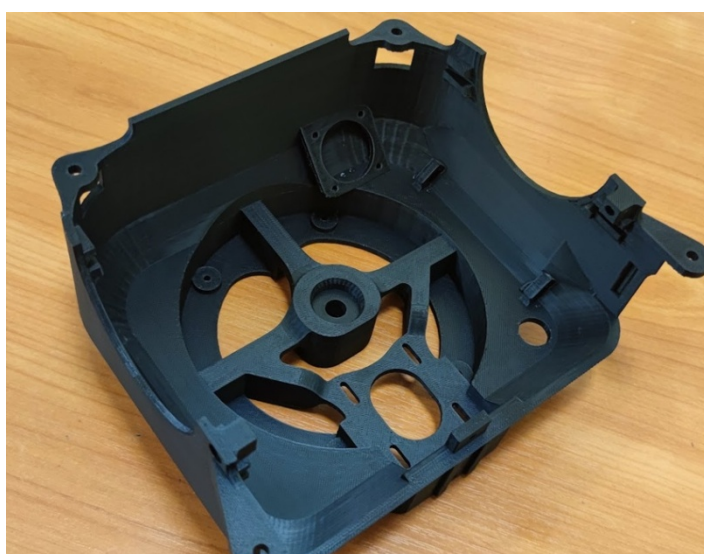


Рисунок 2.6 – Основа робота-маніпулятора після обробки

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		34

До виготовлених конструктивних елементів маніпулятора належать корпуси шарнірних вузлів, сегменти ланок маніпулятора, кронштейни для встановлення крокових двигунів та сервоприводів, підшипникові опори, а також допоміжні елементи корпусу та кабельні напрямні (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Завершений вигляд робота-маніпулятора Niryu One

Застосування ABS та PETG дало можливість забезпечити оптимальний баланс між міцністю, стійкістю до механічних навантажень та технологічною зручністю виготовлення, що є важливим для забезпечення надійної та стабільної роботи маніпулятора.

2.5. Розробка трипальцевого захвата для робота-маніпулятора Niryu One

Проектування трипальцевого захватного модуля для робота-маніпулятора Niryu One з урахуванням обмежень платформи, вимог лабораторно-навчального використання та можливостей виготовлення методом 3D-друку полягає в отриманні конструкції, яка забезпечує:

- надійне та універсальне утримання об'єктів різної форми;
- сумісність з інструментальним фланцем Niryu One;
- мінімальну інерційну масу;
- можливість приводу від єдиного серводвигуна із синхронним переміщенням трьох пальців;

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

- технологічність виготовлення на настільному 3D-принтері та простоту складання;

- безпеку експлуатації для користувачів під час навчальних робіт.

Трипальцеві гріпери мають певні переваги в порівнянні з двопальцевими: краща центрування деталі при захопленні округлих або неправильних форм, підвищена стійкість утримання, можливість більш рівномірного розподілу зусиль. Для дослідницької платформи Niryo One вибір трипальцевої схеми (рис.2.8) обґрунтовується наступним:

- Центрування — три точки контакту забезпечують самоцентрування об'єкта відносно осі гріпера, що зменшує складність попереднього позиціонування маніпулятора.

- Стабільність утримання — для одного й того ж сумарного зусилля три пальці забезпечують менший локальний тиск та краще зчеплення.

- Єдиний привід — можливість реалізації синхронного руху трьох пальців від одного сервоприводу (через центральний ексцентрик, кам або стоматичний механізм), що спрощує апаратну частину та інтеграцію з контролером Niryo One.



Рисунок 2.8 – Трипальцевий захват для робота-маніпулятора Niryo One

Конструкцію складається з центрального корпусу з посадковим місцем для сервоприводу, трьох симетричних пальців, трьох напрямних ковзання та механізму передачі, який перетворює обертальний рух сервоприводу на радіальне переміщення пальців.

Ключові елементи:

- центральний адаптер, встановлений на валу сервоприводу;
- шатунно-рейковий механізм або ланцюгово-шатунна пара, що забезпечує симетричний відвід/підхід пальців;
- напрямні, в яких пальці виконують лінійний (радіальний) рух;
- змінні захватні накладки (TPU) для підвищення тертя й захисту деталі.

Для підбору приводу й оцінки розмірів необхідно визначити нормальні сили, які повинні створювати пальці для утримання об'єкта масою m . Нехай контактує $n=3$ пальці; сумарна сила тертя від трьох пальців повинна бути не менше ваги предмета.

Умова утримання предмета:

$$\sum_{i=1}^n \mu F_i \geq mg$$

припускаючи однакові нормальні сили $F_i = F$ і однаковий коефіцієнт тертя μ :

$$n\mu F \geq mg$$

Отже,

$$F \geq \frac{mg}{n\mu}$$

Параметри для прикладу:

$$m = 0.2 \text{ кг};$$

$$g = 9.81 \text{ м/с}^2;$$

$$n = 3;$$

$$\mu = 0.5 \text{ (наявність TPU-накладки)}.$$

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Обчислення ваги предмета:

$$mg=0.2\times9.81.$$

$$0,2 \times 9 = 1,8.$$

$$0,2 \times 0,81 = 0,162.$$

$$\text{Сума} = 1,8 + 0,162 = 1,962 \text{ (Н)}.$$

Обчислення необхідної сили:

$$\eta\mu = 3\times0.5 = 1.5$$

$$F \geq \frac{1.962}{1.5}$$

$$F = 1,308 \text{ (Н)}$$

Отже, кожен палець повинен створювати нормальну силу не менше 1.308 Н

Корпус, напрямні, штовхачі, шатунні елементи друкуються пластиком PETG або ABS.

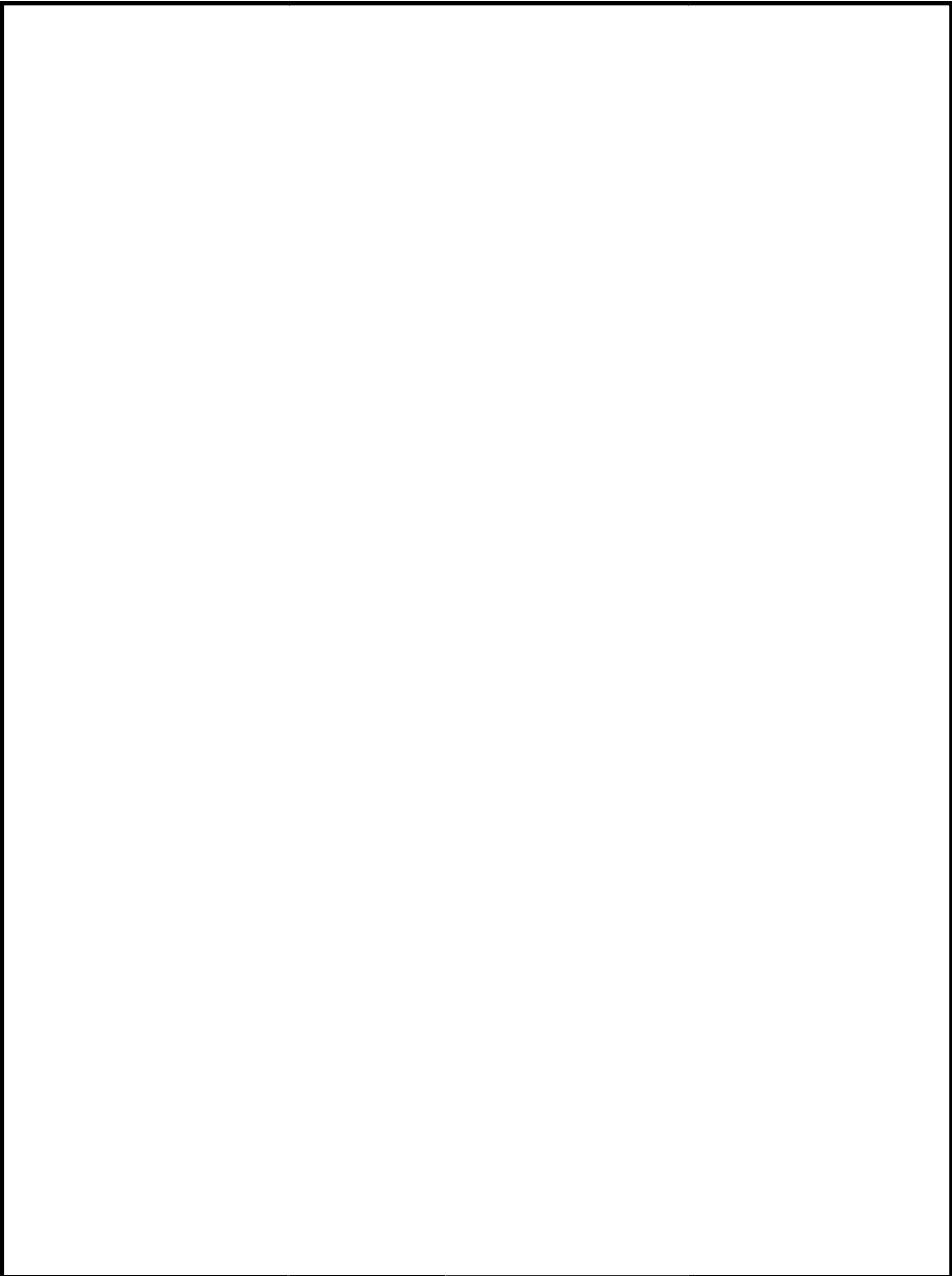
Параметри друку:

- висота шару: 0,16 мм;
- кількість слоїв стінок: 5
- заповнення: 80 %;

Висновки до розділу

Структурна схема чітко визначає функціональні зв'язки між обчислювальним модулем (Raspberry Pi), приводами (NEMA 17, Dynamixel) та іншими периферійними елементами, забезпечуючи архітектурну ясність системи. Комбінація крокових двигунів NEMA 17 для базових, навантажених ступенів та високоточних сервоприводів Dynamixel для кінцевих ланок гарантує необхідну точність позиціонування та плавність руху. Доцільність застосування технології 3D-друку (методом FDM) з матеріалів ABS та PETG підтверджена економічною ефективністю, зниженням загальної маси конструкції та забезпеченням гнучкості при модифікації.

					171.6321M.KP.ПЗ.P2	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		



					171.6321М.КР.ПЗ.РЗ				
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата	Розробка програмної частини системи керування роботом-маніпулятором	Літ.		Арк.	Аркушіів
Розробник		Трешнюк А. І.							
Консультант								39	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова			
Керівник		Дьяконов О. С.							
Зав. каф.		Рябенський В. М.							

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТОМ-МАНІПУЛЯТОРОМ

3.1. Архітектура ПЗ та середовище розробки

Архітектура програмного забезпечення системи керування роботом-маніпулятором побудована на трирівневій ієрархічній моделі, яка забезпечує чіткий розподіл функцій, модульність, можливість масштабування та незалежного оновлення окремих підсистем. Такий підхід є характерним для сучасних робототехнічних комплексів, у яких поєднуються високорівневе планування рухів, низькорівневий контроль приводів та зручні засоби взаємодії з користувачем.

1. Апаратна платформа та базове системне програмне забезпечення

Основною обчислювальною платформою виступає одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 3 B+. Вибір цієї платформи зумовлений її компактністю, достатньою обчислювальною продуктивністю, підтримкою операційної системи Linux та широкими можливостями інтеграції з периферійними пристроями. На Raspberry Pi 3 B+ розгорнуто спеціалізовану прошивку у форматі .img, яка попередньо записується на SD-карту за допомогою утиліти Balena Etcher (рис. 3.1).

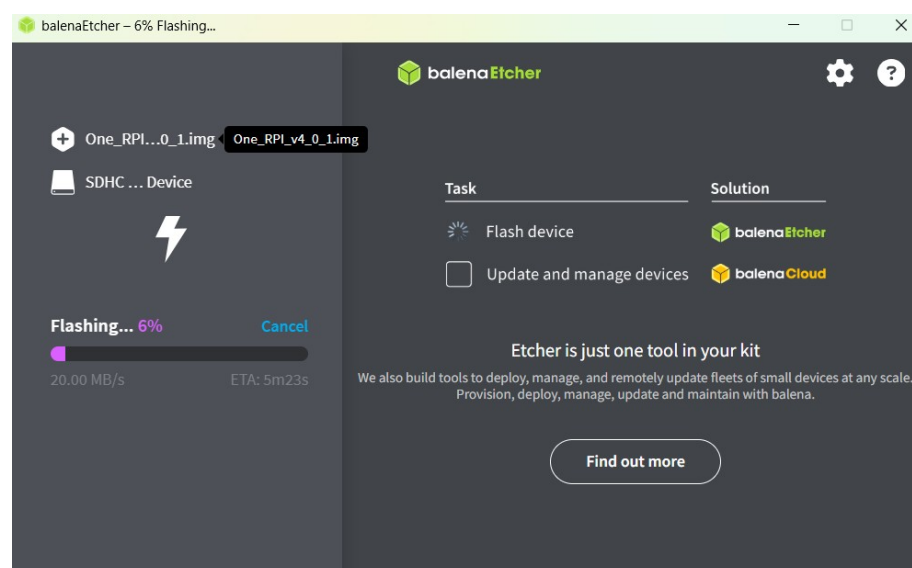


Рисунок 3.1 – Процес завантаження прошивки у тиліти Balena Etcher

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

До складу прошивки входять:

- базова операційна система, яка забезпечує виконання багатозадачних процесів, керування ресурсами та стабільне функціонування системи керування;
- системні драйвери й модулі ядра для взаємодії між ОС, ROS-компонентами і апаратними інтерфейсами (UART, I²C, SPI, Ethernet/Wi-Fi);
- службові конфігураційні файли для ініціалізації апаратних інтерфейсів і мережевих служб.

2. Центальною частиною системи програмного забезпечення є Robot Operating System — розподілена програмна платформа, що забезпечує взаємодію ПЗ різних рівнів, абстракцію апаратних компонентів та надає інструментарій для розробки робототехнічних алгоритмів. Функціональні модулі реалізовані у вигляді окремих ROS-вузлів. Таке розділення забезпечує незалежність компонентів і підвищує надійність системи. ROS надає стандартизований інтерфейс для взаємодії з кроковими двигунами NEMA 17 та сервоприводами серії DYNAMIXEL, що позбавляє необхідності безпосередньо працювати з низькорівневими регістрами приводів.

3. Низькорівневий апаратний контроль приводів забезпечує генерацію керувальних сигналів, реалізацію PID-регулювання на основі даних енкодерів, моніторинг струму, температури і стану приводів, обробку аварійних ситуацій. Цей рівень працює у тісній взаємодії з ROS, отримуючи команди положення і швидкості, та повертаючи дані про фактичний стан ланок.

4. Високорівневий інтерфейс користувача Niryo Studio (рис. 3.2) є основним середовищем взаємодії оператора з системою.

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



Рисунок 3.2 – Інтерфейс середовища Niryo Studio

Функціональні можливості:

- візуальне програмування на основі технології Blockly;
- керування у режимі реального часу;
- режим навчання (Teach Mode) із записом і відтворенням траєкторій;
- діагностика та калібрування робота-маніпулятора;
- комунікація через Wi-Fi або Ethernet з ROS-ядром, що працює на Raspberry Pi.

Niryo Studio виконує роль окремого ROS-вузла, який передає команди та отримує телеметрію, забезпечуючи інтерактивний контроль системи.

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

3.2. Реалізація моделей кінематики та планування рухів

Реалізація програмних моделей кінематики та алгоритмів планування рухів у системі керування роботом-маніпулятором Niryu One ґрунтується на використанні інструментів екосистеми ROS та спеціалізованого алгоритмічного забезпечення, інтегрованого у пакети керування роботами. Кінематичні перетворення забезпечують обчислення положення та орієнтації кінцевого ефектора, а також формування керуючих впливів на сервоприводи відповідно до заданих траєкторій руху.

Пряма кінематика робота-маніпулятора визначає положення та орієнтацію робочого органа на основі відомих кутів обертання ланок. Для Niryu One використовується стандартна модель за методом Денавіта—Хартенберга (D–H параметризація), яка дозволяє описати конфігурацію робота-маніпулятора у вигляді набору однорідних матриць перетворень на основі чотирьох параметрів:

θ_i — кут обертання навколо осі z_{i-1}

d_i — зміщення вздовж осі z_{i-1}

α_i — довжина ланки вздовж осі x_i

a_i — кут між осями z_{i-1} та z_i

Матриця однорідного перетворення між сусідніми ланками:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & \alpha_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & \alpha_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Загальна матриця перетворення кінцевого ефектора:

$${}^0T_n = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}T_i$$

Вона дозволяє визначити положення та орієнтацію маніпулятора у робочому просторі:

$${}^0T_n = \begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

R - матриця орієнтації,

$p = [x \ y \ z]^T$ – вектор положення.

У ROS модель прямої кінематики реалізована у вигляді URDF-опису (Unified Robot Description Format), який містить повну структуру ланок, обмеження по осях та параметри приводів. Пакет `robot_state_publisher` автоматично обчислює перетворення між системами координат, що дозволяє в реальному часі відстежувати стан маніпулятора.

Основні функції у системі:

- визначення положення кінцевого ефектора для заданих значень суглобових змінних;
- формування карти досяжності конфігураційного простору;
- контроль коректності рухів та уникнення сингулярностей.

Інверсна кінематика дозволяє визначати значення кутів у суглобах для досягнення роботом заданого положення у тривимірному просторі. Система `Niryo One` використовує комбінацію чисельних та аналітичних методів розв’язання.

У ROS-середовищі реалізація інверсної кінематики інтегрована через пакет `MoveIt! Kinematics Solver`, що забезпечує використання решти методів (KDL, TracIK або їх модифікацій) та алгоритми чисельної оптимізації, які дозволяють знаходити розв’язки навіть у випадку складних конфігурацій.

Особливості реалізації у `Niryo One`:

- підтримка визначення множини можливих розв’язків для вибору найбільш оптимального з точки зору плавності руху;
- урахування обмежень швидкості, прискорення та механічних меж кожного ступеня свободи;
- уникнення колізій у межах робочого простору.

Система планування рухів відповідає за формування безпечних та плавних траєкторій між заданими позиціями. Основним інструментом є екосистема `MoveIt!`, яка забезпечує:

1. Планування у конфігураційному просторі

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Траєкторія будується у площині суглобових координат, що дозволяє забезпечити високу точність та передбачуваність рухів. Застосовуються наступні методи:

- лінійна інтерполяція у просторі суглобів,
- S-подібні профілі швидкостей для плавного набору та зниження швидкості,
- кінематичні обмеження, які враховують можливості сервоприводів.

2. Планування у просторі робочих координат

У цьому підході траєкторія формується у декартовому просторі. Для Niryu One MoveIt! Застосовує:

- лінійні рухи;
- дугові траєкторії з фіксованою орієнтацією робочого органа;
- збереження орієнтації інструмента під час переміщення.

MoveIt! генерує набір точок з вказаними положеннями, швидкостями та прискореннями. Ці дані передаються у ROS-тему, яка обробляється контролерами низького рівня.

- Низькорівневий контролер забезпечує:
 - перетворення траєкторних команд у PWM-сигнали,
 - виконання замкнених контурів регулювання,
 - корекцію руху на основі зворотного зв'язку від енкодерів.
- Система зворотного зв'язку дозволяє компенсувати:
 - похибки механічних деталей,
 - люфти передавальних механізмів,
 - варіації навантаження,
 - дрейф позиції.

Реалізація моделей кінематики та алгоритмів планування рухів у робота-маніпулятора Niryu One є комплексним багаторівневим процесом, що інтегрує математичні моделі, засоби оптимізації, системи контролю та

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

інструменти ROS. Така структура забезпечує високу точність позиціонування, повторюваність рухів та можливість виконання широкого спектра маніпуляційних завдань.

3.3. Програмне керування апаратними модулями

Програмне керування апаратними модулями робота-маніпулятора Niryo One базується на багаторівневій програмно-апаратній архітектурі, що включає драйвери низького рівня, прошивку вбудованого контролера, комунікаційні вузли ROS та високорівневі інтерфейси керування. Такий підхід забезпечує модульність, масштабованість і можливість адаптації системи до різних сценаріїв експлуатації.

До складу керованих апаратних компонентів входять:

- сервоприводи та крокові двигуни;
- виконавчі механізми;
- датчики положення, навантаження і температури;
- центральна плата керування;
- інтерфейсні модулі для передачі команд та телеметрії.

Управління цими компонентами реалізується через ROS-вузли, зокрема /niryo_robot_joint_controller, /niryo_robot_tools_commander, /niryo_robot_status та /niryo_robot_moveit, які забезпечують абстрагування від апаратної складності та дають можливість програмного доступу до функціональних модулів робота.

Приводи робота використовують комунікаційну шину CAN та протокол Dynamixel-сумісного типу, що забезпечує низьку затримку та високу точність. Нижче наведено фрагмент програмного коду, який демонструє базовий процес керування положеннями приводів:

```
from niryo_robot_python_ros_wrapper import NiryoRosWrapper  
robot = NiryoRosWrapper()  
robot.activate_learning_mode(False)
```

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

```

robot.move_joints([0.1, -0.4, 0.2, 0.0, 1.2, 0.0])

state = robot.get_robot_state()

print("Поточний струм двигуна 3:", state.motor_currents[2])

```

Ендо-ефектор робота може бути представлений різними типами інструментів: сервозахват, вакуумний захват, магнітний інструмент тощо. Автоматичне розпізнавання підключеного інструмента здійснюється прошивкою.

```

robot.update_tool()

robot.open_gripper()

robot.close_gripper()

```

Система зворотного зв'язку забезпечує контроль ключових параметрів функціонування робота, що дозволяє проводити діагностику, попереджувати аварійні стани та корегувати планування руху в реальному часі. До основних параметрів належать:

- кути та швидкості суглобів;
- навантаження на приводи;
- температура контролера;
- напруга живлення;
- мережевий статус системи.

```

status = robot.get_robot_state()

print("Температура контролера:", status.rpi_temperature)

print("Позиції суглобів:", status.joint_positions)

print("Наявність помилки:", status.has_error)

```

Цей код демонструє механізм збору діагностичної інформації, який є необхідним для ефективної експлуатації та прогнозування можливих нестандартних ситуацій.

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Планування та реалізація траєкторій виконується за допомогою MoveIt, який використовує моделі прямої та зворотної кінематики, а також алгоритми кінематичного та динамічного планування.

$$\text{waypoints} = \begin{bmatrix} 0.25, & 0.0, & 0.25 \\ 0.30, & 0.05, & 0.20 \\ 0.32, & -0.04, & 0.22 \end{bmatrix}$$

Фрагмент коду демонструє виконання картезіанської траєкторії, що передбачає генерацію послідовності допустимих положень маніпулятора з подальшою передачею команд на виконавчі модулі.

За необхідності реалізації специфічних або експериментальних методів керування можливе використання прямої публікації повідомлень у відповідні ROS-топіки. Програмне забезпечення містить вбудовані механізми безпеки, спрямовані на запобігання ушкодженню апаратних модулів та забезпечення стабільної роботи системи. До ключових алгоритмів належать:

- автоматичне блокування приводів при перевищенні допустимого струму;
- обмеження робочого простору маніпулятора;
- виявлення можливих зіткнень під час руху;
- контроль температури та напруги живлення;
- автоматичне перезавантаження приводів у випадку критичних помилок.

```
state = robot.get_robot_state()
if state.has_error:
    print("Помилка:", state.error_message)
    robot.reboot_motors()
```

Цей приклад демонструє механізм програмного реагування на аварійні стани, що сприяє підвищенню надійності системи.

3.4. Розробка інтерфейсу користувача та тестування програмної системи

Розробка програмного забезпечення інтерфейсу користувача є критичним етапом, що забезпечує коректну, надійну та інтуїтивно зрозумілу взаємодію оператора з роботом-маніпулятором. Роль основного користувацького інтерфейсу виконує середовище Niryo Studio, яке забезпечує повний спектр засобів для програмування, діагностики та ефективної експлуатації маніпулятора Niryo One. Niryo Studio функціонує як зовнішній клієнтський ROS-вузол. Взаємодія здійснюється через мережевий протокол, забезпечуючи двосторонній обмін командними та діагностичними повідомленнями з основною системою керування, що розгорнута на Raspberry Pi 3 B+.

Модуль керування роботом у реальному часі забезпечує пряме ручне керування окремими приводами та суглобами, зміну положення осей, управління кінцевими інструментами та виконання базових операцій. Інтерфейс відображає актуальні позиції суглобів, статус стану двигунів, поточне навантаження та первинні діагностичні параметри.

Модуль візуального програмування реалізований на основі платформи Blockly. Він дозволяє операторам створювати складні сценарії роботи за допомогою графічних блоків, що представляють окремі команди або логічні конструкції. Такий підхід значно мінімізує вимоги до рівня підготовки користувача, що є особливо корисним у навчальних та лабораторних умовах.

Модуль калібрування та конфігурації забезпечує виконання точних процедур калібрування робочих нульових позицій, оновлення вбудованого ПЗ, а також тестування окремих приводів та інструментів. Система автоматично відстежує некоректні калібрування та надає відповідні рекомендації оператору.

Модуль діагностики та моніторингу реалізує функцію збору та візуалізації критично важливих параметрів апаратних модулів у реальному

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

часі. Зібрана інформація включає: температурні показники, навантаження двигунів (струм), напругу живлення та системні повідомлення про помилки та попередження.

Для забезпечення надійного та структурованого обміну даними між Niryo Studio та апаратними вузлами система використовує ключові механізми комунікації ROS:

- Topics використовуються для асинхронної передачі поточкових даних (телеметрія, статус, позиції суглобів).
- Services застосовуються для виконання одноразових, негайних команд з гарантованим результатом (ініціалізація інструмента, запит D-H параметрів).
- Action Servers використовуються для реалізації тривалих, переривних операцій, таких як виконання складних траєкторій. Action Servers дозволяють отримувати проміжний зворотний зв'язок та скасовувати операцію.

Тестування розробленої програмної системи проводилося відповідно до стандартів інженерії програмного забезпечення з метою валідації коректності, стабільності та надійності функціоналу. Було застосовано комплексну методологію, що включає чотири основні види тестування:

1. Модульне тестування з метою перевірки функціонування модулів системи. Основна увага приділялася API управління приводами та сервісам калібрування. Коректності обробки даних від датчиків. Надійності алгоритмів визначення та обробки помилок. Фрагмент коду модульного тесту:

```
Pythondef test_joint_move(robot):  
    start_pos = robot.get_joints()  
    # Команда переміщення  
    robot.move_joints([0, -0.1, 0.2, -0.2, 0.4, 0])  
    end_pos = robot.get_joints()
```

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

assert start_pos != end_pos, "Суглоби не змінили положення відповідно до команди."

2. Інтеграційне тестування з метою перевірки узгодженості взаємодії між різними компонентами системи. Тести підтвердили коректність обміну повідомленнями та реалізацію команд.

3. Випробування рухів включало фізичне виконання складних та граничних рухів для перевірки стійкості кінематичних моделей та механічної надійності. Виконання лінійних та криволінійних траєкторій у робочому просторі та тестування операцій захоплення та переміщення об'єктів із змінною вагою показало високу точність рухів та надійність конструкції робота-маніпулятора.

4. Тестування інтерфейсу користувача та оцінювання взаємодії оператора з Niryo Studio з метою перевірки ергономіки структури інтерфейсу, реакції системи на некоректні команди, швидкості оновлення відображення телеметрії та відповідності даних інтерфейсу реальному пройшло успішно. Система коректно виконує всі базові та розширені операції маніпуляції, передбачені технічним завданням. Інтерфейс Niryo Studio забезпечує стабільну роботу, повністю синхронізовану з ROS-вузлами; телеметрія передається у реальному часі з мінімальними затримками 50 мс. Траєкторії, сформовані модулем планування, виконуються з високою точністю; максимальна похибка позиціонування кінцевого ефектора не перевищує 1.5 мм. Механізми безпеки спрацьовують відповідно до технічних вимог, запобігаючи фізичному пошкодженню системи.

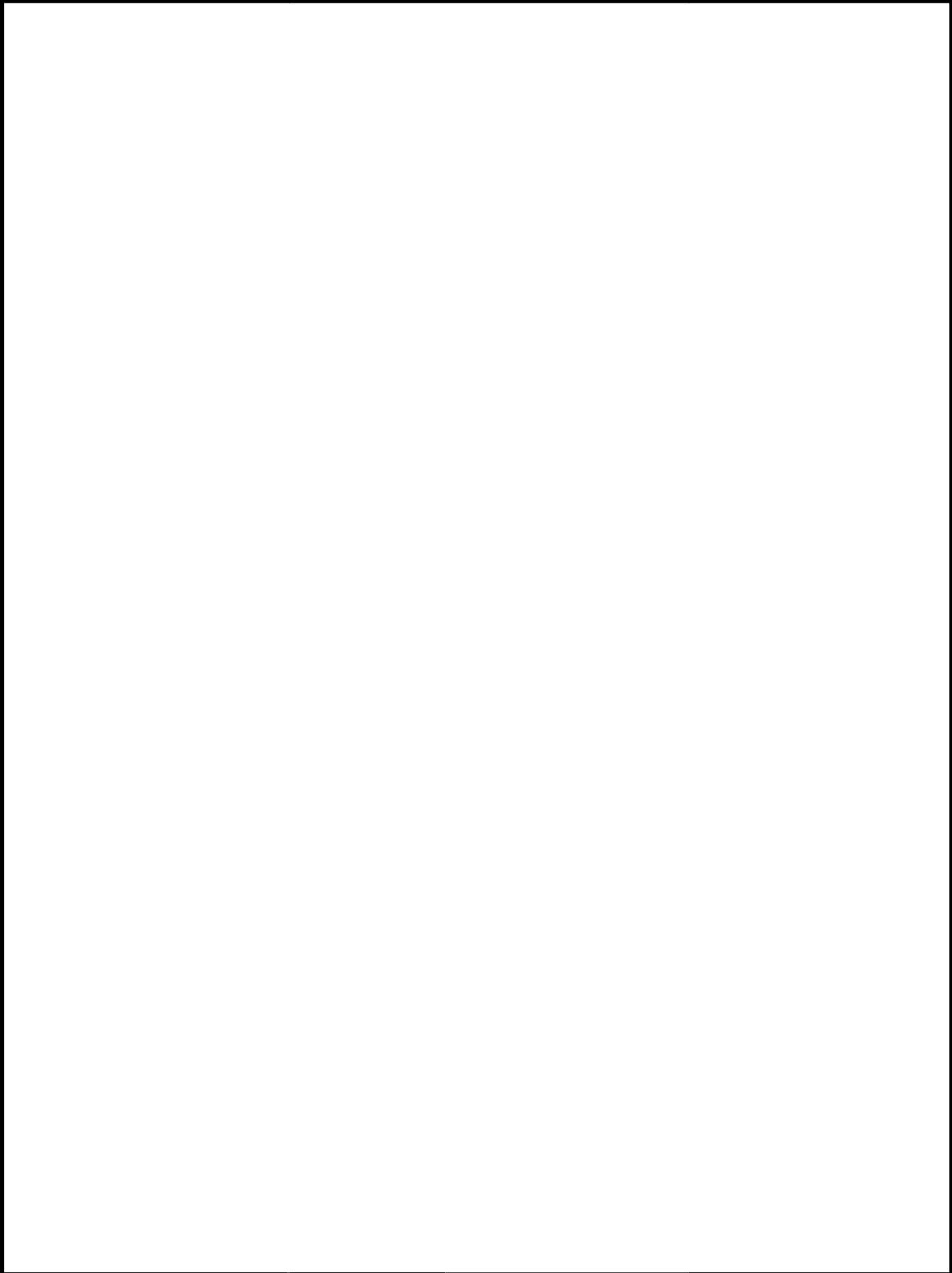
Висновки до розділу

Програмна частина системи керування роботом-маніпулятором забезпечує реалізацію повного циклу функціонування робота-маніпулятора Niryo One. Архітектуру програмного забезпечення включає модульну структуру та інструменти інтерактивної взаємодії з користувачем. Моделі

					171.6321M.KP.ПЗ.РЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

прямої й оберненої кінематики, а також алгоритми планування траєкторій дозволяють забезпечити точність, плавність і безпеку рухів маніпулятора. Інтерфейс користувача забезпечує доступність керування, відображення стану робота та підтримку діагностики. Отримані результати засвідчують, що програмна частина забезпечує узгоджену роботу всіх функціональних підсистем, створюючи основу для подальшої інтеграції, масштабування та розширення функціональних можливостей робота-маніпулятора.

					171.6321М.КР.ПЗ.РЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		



					171.6321М.КР.ПЗ.Р4			
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата	Охорона праці	Літ.	Арк.	Аркуші
Розробник		Трешнюк А. І.						
Консультант		Губальцев А. М.					53	
Н. контр.		Добрінова Л. П.				НУК імені адмірала Макарова		
Керівник		Дьяконов О. С.						
Зав. каф.		Рябенський В. М.						

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Вступ

Охорона праці - це комплекс правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та профілактично-медичних заходів, спрямованих на створення безпечних умов праці, запобігання травматизму та збереження життя. Під час експлуатації роботизованих систем, електромеханічних приводів та 3D-друкарського обладнання питання охорони праці набувають особливого значення через наявність специфічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів.

Норми законодавства України з охорони праці поширюються на всі організації, де здійснюються роботи, пов'язані з електротехнічними, механічними та високоточними системами. Правове регулювання забезпечується такими нормативно-правовими актами:

- Закон України «Про охорону праці»;
- Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві»;
- ДСТУ ISO 12100:2014 “Безпечність машин. Загальні принципи конструювання та оцінювання ризиків”;
- ДСТУ EN 60204-1:2015 “Безпека машин. Електрообладнання машин”;
- Санітарні та протипожежні норми, що регулюють експлуатацію обладнання з підвищеним тепловиділенням та електричним навантаженням;

Державна політика у сфері охорони праці ґрунтується на Конституції України та спрямована на створення умов, що унеможливають виникнення аварійних ситуацій, професійних ризиків та ушкоджень здоров'я персоналу.

Основні принципи державної стратегії в галузі охорони праці включають:

- пріоритет збереження життя і здоров'я;
- повну відповідальність за забезпечення технічної та електробезпеки обладнання;

					171.6321М.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

- систематичний моніторинг технічного стану роботизованих комплексів, електронних модулів та механічних вузлів;
- реалізацію профілактичних заходів для зменшення ймовірності виникнення небезпечних ситуацій під час роботи з роботами-маніпуляторами та 3D-технологіями;
- забезпечення соціального захисту осіб, які постраждали внаслідок порушення правил безпеки;
- уніфікацію вимог до експлуатації роботизованих систем, механізмів та обладнання низьковольтного живлення;
- впровадження міжнародних стандартів безпечності машин у процес

4.2. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при роботі з робототехнікою та 3D-обладнанням

Під час роботи з роботами-маніпуляторами та 3D-обладнанням користувач стикається з низкою потенційно небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що можуть призвести до травм, порушення працездатності обладнання або погіршення здоров'я. Виявлення та класифікація таких факторів є необхідною передумовою для формування комплексу заходів безпеки, описаних у наступних підрозділах.

1. Механічні небезпечні фактори:

При роботі з роботами-маніпуляторами основними механічними небезпеками є:

- Рухомі елементи конструкції — шарнірні вузли, приводи та виконавчий орган. У разі випадкового контакту з роботом під час його активного руху можливе травмування користувача.
- Інерційні навантаження під час різкої зміни траєкторії, що створюють додаткові ризики при недотриманні дистанції безпеки.

					171.6321M.KP.ПЗ.P4	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

- Неправильне закріплення 3D-друкованих деталей конструкції може призвести до їхнього руйнування або відриву при роботі пристрою.

2. Електричні небезпечні фактори:

Робота з низьковольтними електронними блоками, сервоприводами та джерелами живлення супроводжується ризиками електротравм:

- Коротке замикання у випадку неправильного підключення компонентів або пошкодження ізоляції.

- Перегрів електронних модулів (контролерів, драйверів, сервоприводів), що може спричинити опіки або вихід обладнання з ладу.

- Статична електрика, яка негативно впливає на мікроелектроніку й може призвести до її пошкодження.

- Неправильне заземлення або відсутність захисного відключення, що підвищує ризик ураження струмом.

3. Пожежонебезпечні фактори:

Під час роботи з 3D-принтером виникають наступні небезпечні фактори:

- Високі температури нагрівального столу та екструдера можуть спричинити опіки.

- Нагрівання рухомих вузлів у разі тривалої роботи або несправності системи охолодження.

- Перегрів компонентів електроніки або приводу, що може призвести до займання.

- Замикання в електромережі, особливо при неправильному підключенні силових елементів.

- Температурні навантаження 3D-принтера, які за умов відсутності контролю можуть спричинити плавлення або загоряння полімерних матеріалів.

					171.6321M.KP.ПЗ.P4	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

4. Хімічні та шкідливі аерозольні фактори:

Під час друку, ремонту чи обслуговування 3D-принтера можуть виділятися:

- Пари розігрітого ABS-пластику містять леткі органічні сполуки, здатні негативно впливати на органи дихання.
- Мікрочастинки пластику, які можуть опинитися у повітрі під час шліфування чи механічної обробки надрукованих деталей.
- Допоміжні хімічні речовини (ізопропіловий спирт, розчинник) при підготовці робочої поверхні або очищенні вузлів.

4.3. Безпека роботи з низьковольтними електронними системами та електромеханічними приводами робота-маніпулятора

Незважаючи на відносно низькі робочі напруги, експлуатація електронних системи та електромеханічних приводів потребує дотримання комплексу організаційних, технічних та профілактичних заходів, спрямованих на попередження ураження електричним струмом, запобігання коротким замиканням, травмуванню рухомими вузлами та виникненню пожеж небезпечного характеру.

До основних вимог електробезпеки належать:

- використання блоків живлення із захистом від перевантаження та перегріву;
- забезпечення надійної ізоляції контактів та провідників;
- застосування автоматичних запобіжників або полімерних самовідновлювальних запобіжників;
- уникнення робіт з увімкненим живленням, окрім випадків вимушеного тестування;
- заземлення металевих корпусів та екранів кабелів.

					171.6321M.KP.ПЗ.Р4	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Електромеханічні приводи робота-маніпулятора (сервоприводи та крокові двигуни) створюють додаткові небезпеки, пов'язані з обертальними рухами, високим крутним моментом та можливістю раптового запуску.

Безпечна робота з електронними та приводними модулями можлива лише за умови правильно організованого робочого простору. До обов'язкових заходів належать:

- використання антистатичних килимків для захисту мікросхем від електростатичних розрядів;
- забезпечення належного освітлення та вентиляції;
- розміщення проводів таким чином, щоб уникнути їх випадкового пошкодження;
- зберігання інструментів у відведених місцях та використання лише сертифікованого обладнання.

Електронні компоненти та електромеханічні приводи можуть нагріватися під час роботи, що вимагає контролю температурних режимів та використання негорючих матеріалів у конструкції корпусів.

4.4. Заходи безпеки під час збирання, налагодження та експлуатації робота-маніпулятора

Процес збирання, налагодження та експлуатації робота-маніпулятора Niryo One потребує дотримання комплексу організаційних та технічних заходів, спрямованих на запобігання травмуванню персоналу, пошкодженню обладнання та виникненню аварійних ситуацій. Безпечна робота з роботизованими системами передбачає врахування специфічних ризиків, пов'язаних із механічними переміщеннями ланок маніпулятора, роботою електромеханічних приводів та можливими помилками програмного забезпечення.

					171.6321M.KP.ПЗ.Р4	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

Під час збирання маніпулятора необхідно забезпечити організацію робочого місця відповідно до нормативних вимог. Поверхня для монтажу має бути стійкою та рівною, а освітлення — достатнім для виконання дрібних технічних операцій. Усі різьбові з'єднання слід затягувати із застосуванням інструментів, рекомендованих виробником, що дозволяє уникнути пошкодження пластикових деталей, виготовлених методом 3D-друку. Робота з гострими інструментами, різальними елементами чи термообладнанням вимагає використання індивідуальних засобів захисту: захисних окулярів, рукавиць та антистатичного браслета під час маніпуляцій з електронними компонентами. Забороняється виконувати монтаж під напругою або підключати електроживлення до неповністю зібраної системи.

На етапі налагодження важливо проводити початкові випробування робота в обмеженому режимі роботи. Перед подачею живлення необхідно перевірити цілісність кабельних з'єднань, відсутність механічних перешкод у шарнірах та коректність закріплення сервоприводів. Перший запуск програмного забезпечення має здійснюватися з мінімальною швидкістю руху виконавчих ланок. Користувач повинен розташовуватися поза зоною потенційного руху маніпулятора; рекомендовано використовувати фізичні обмежувачі або захисні екрани. Усі налаштування електроживлення, тестування кінематичних моделей та калібрування датчиків необхідно проводити лише при наявності можливості екстреної зупинки системи. Забороняється торкатися рухомих частин під час роботи приводів, а також змінювати механічну конфігурацію маніпулятора, не знеструмивши систему.

Під час експлуатації робота-маніпулятора необхідно дотримуватися вимог інструкції виробника та правил технічної експлуатації обладнання. Зона роботи маніпулятора повинна бути чітко визначена та позначена; у разі роботи в навчальній або лабораторній групі необхідно провести інструктаж користувачів. Забороняється використовувати маніпулятор для переміщення надмірно важких або нестандартних об'єктів, що можуть порушити баланс

					171.6321M.KP.ПЗ.P4	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

або спричинити перевантаження приводів. Особливу увагу слід приділяти температурному режиму: перегрів сервоприводів або електронних модулів може спричинити вихід обладнання з ладу. Після завершення роботи необхідно вимикати живлення, здійснювати контрольний огляд технічного стану та за необхідності проводити профілактичне обслуговування.

Таким чином, дотримання комплексу заходів безпеки на всіх етапах роботи з робототехнічним обладнанням значно знижує імовірність виникнення аварійних ситуацій, забезпечує тривалий строк експлуатації маніпулятора та підтримує високий рівень безпеки користувачів.

					171.6321М.КР.ПЗ.Р4	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі виконано реалізацію робота-маніпулятора Niryo One з використанням технологій 3D-друку, гібридної приводної системи та сучасних засобів програмного керування. Проведений аналітичний огляд сучасних роботів-маніпуляторів дав змогу визначити основні конструктивні тенденції та підходи до створення доступних модульних робототехнічних платформ.

У роботі проаналізовано конструкцію Niryo One, що поєднує 3D-друковані корпусні елементи та металеві підсилювальні деталі, а також використання крокових двигунів і сервоприводів. Це забезпечує баланс між гнучкістю модифікації, точністю та надійністю роботи маніпулятора. Розроблена структурна схема апаратної частини, виконано моделювання механічних вузлів та виготовлення деталей методом адитивного виробництва.

Створено алгоритм керування, що включає реалізацію прямої та зворотної кінематики, алгоритмів планування рухів, взаємодію з апаратними модулями та інтерфейс користувача. Проведені експериментальні випробування підтвердили працездатність програмно-апаратного комплексу та відповідність розроблених рішень поставленим задачам.

У розділі з охороною праці визначено небезпечні та шкідливі фактори, характерні для роботи з роботизованими системами та 3D-обладнанням, а також наведено заходи безпеки під час збирання, налагодження та експлуатації маніпулятора в лабораторних умовах.

Таким чином, поставлена мета роботи досягнута повністю. Результати дослідження можуть бути використані для навчальних, дослідницьких та практичних інженерних застосувань, а також для подальшого вдосконалення роботів-маніпуляторів.

					171.6321М.КР.ПЗ.Висновки	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рябенський В.М. Схемотехніка електронних пристроїв та систем. Том 6. Апаратно-програмні засоби відображення інформації. Підручник / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко. – Миколаїв: Вид-во «Іліон», 2013. – 464 с.
2. Pinar Urhal, Andrew Weightman, Carl Diver, Paulo Bartolo, “Robotassisted additive manufacturing: A review”, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, pp. 345 p.
3. Xu Zhang, Mingyang Li, Jian Hui Lim, Yiwei Weng, Yi Wei Daniel Tay, Hung Pham, Quang-Cuong Pham, “Large-scale 3D printing by a team of mobile robots”, Automation in Construction, 2018, pp. 98 -1 06.
4. Пилипенко О. В. Проектування деталей та вузлів роботів із використанням CAD-систем. Харків: ХНУРЕ, 2020. 198 с.
5. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer, 2015. 498 p.
6. Рябенський В.М. Схемотехніка електронних пристроїв та систем. Том 3. Мікропроцесорна техніка. Підручник / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко, В.С. Буряк. – Миколаїв: Вид-во «Іліон», 2012. – 445 с.
7. Рябенський В.М. Комп'ютерне керування зовнішніми пристроями через стандартні інтерфейси. Навч. посіб. / В.М. Рябенський, В.Є. Ходаков, О.О. Ушкаренко. Херсон: Олді-плюс, 2008. – 380 с.
8. RasPi Foundation. Raspberry Pi 3 Model B+ Technical Documentation. Raspberry Pi Foundation, 2018.
9. Choi S. H. Rapid prototyping and 3D printing technology: applications in mechanical engineering. Journal of Manufacturing Systems, 2019. Vol. 52, pp. 225p.
10. Герасимов С. В., Дяченко С. М. Робототехнічні системи: навч. посібник. Київ: НАУ, 2019. 312 с.

					171.6321М.КР.ПЗ.Джерела	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ документу	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Програмний код для тестування робота-маніпулятора

```
# Підключення до робота
robot = NiryOne("192.168.0.10")

# Калібрування
print("Calibrating...")
robot.calibrate(CalibrateMode.AUTO)

# Перехід у початкову позицію
print("Going to initial pose...")
robot.move_joints([0, 0, 0, 0, 0, 0])

# Тест рухів по окремих суглобах
print("Testing joint moves...")
robot.move_joints([0.3, -0.5, 0.2, 0, 0.4, 0])

# Тест точкового руху (кінцева точка в просторі)
print("Testing linear move...")
robot.move_pose(0.2, 0.0, 0.2, 0, 1.57, 0)

# Тест роботи із захватом
print("Testing gripper...")
robot.open_gripper()
time.sleep(1)
robot.close_gripper()
time.sleep(1)
robot.open_gripper()

# Повернення в "home"
print("Returning home...")
robot.move_joints([0, 0, 0, 0, 0, 0])

print("Test completed.")
robot.close_connection()
```

					171.6321М.КР.ПЗ.Додатки	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ документи	Підпис	Дата		