

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА
Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

РОЗРАХУНКОВО-ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА
на тему: «Багатокоординатний робот-маніпулятор на основі крокових
двигунів»

Виконав: здобувач вищої освіти
4 курсу, групи _СІНЖ-2022-1____
спеціальності 151 «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»
____Бабаєв В.В._____
(прізвище та ініціали)

Керівник ____Кулаєнко О.О._____
(прізвище та ініціали)

Рецензент
Тимофєєв О.В._____
(прізвище та ініціали)

Харків – 2026 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА**

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

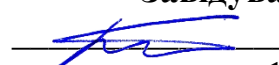
Освітньо-кваліфікаційний рівень – бакалавр

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

Галузь знань – 15 «Автоматизація та приладобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

 Олег БАРАНОВ
«19» червня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Бабаєв Володимир Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача вищої освіти)

Тема роботи «Багатокоординатний робот-маніпулятор на основі
крокових двигунів» затверджено наказом університету від «22» травня 2026
року № 440-03.

Керівник роботи к.т.н., доцент Кулаєнко О.О.

2. Строк подання роботи здобувачем вищої освіти «15» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи – об'єкт дослідження: п'ятиосьовий
роботизований маніпулятор із друкованими несучими елементами, приводами
на базі крокових двигунів NEMA 23 та NEMA 17, ремінною редукцією на
базовій осі, зовнішніми драйверами DM542/DM556, платою керування
BIGTREE TECH Octopus V1.1 та стендом для експериментального
налагодження сигналів STEP/DIR.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: вступ; розділ 1 – аналіз
задачі дослідження; розділ 2 – аналітичний розділ; розділ 3 – технічне та
програмне забезпечення роботизованої системи; розділ 4 – охорона праці та
безпека в надзвичайних ситуаціях; висновки; перелік джерел інформації;
додатки.

5. Перелік графічного матеріалу: презентація, структурна схема системи,
схема підключення, кінематична схема маніпулятора, загальний вигляд
експериментального стенда.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання видав	Підпис, дата завдання прийняв
Розділ 1. Аналіз задачі дослідження	Кулаєнко О.О.		
Розділ 2. Аналітичний розділ	Кулаєнко О.О.		
Розділ 3. Технічне та програмне забезпечення	Кулаєнко О.О.		
Розділ 4. Охорона праці	Малишева В.В.		

7. Дата видачі завдання «22» травня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання розділів	Примітка
1.	Розділ 1. Аналіз задачі дослідження	28.05.2026 р.	
2.	Розділ 2. Аналітичний розділ	12.06.2026 р.	
3.	Розділ 3. Технічне та програмне забезпечення	13.06.2026 р.	
4.	Розділ 4. Охорона праці	13.06.2026 р.	
5.	Оформлення пояснювальної записки та підготовка доповіді	15.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти  _____

Керівник  _____

Реферат

У пояснювальній записці розглянуто розробку п'ятиосьового роботизованого маніпулятора з друкованими конструктивними елементами та приводами на основі крокових двигунів. Основну увагу приділено вибору раціональної кінематичної схеми, оцінці навантажень на базову вісь, обґрунтуванню ремінної редукції 1:4 для підвищення крутного моменту, а також побудові силової та керуючої частин експериментального стенда.

Робота охоплює опис механічної структури маніпулятора, параметрів двигунів NEMA 23 та NEMA 17, особливостей застосування зовнішніх драйверів DM542/DM556, джерел живлення 48 В і 24 В, а також використання плати BIGTREETECH Octopus V1.1 як перспективної платформи керування. Для первинного налагодження та перевірки працездатності реалізовано стенд із генератором імпульсів STEP/DIR, що дало змогу перевірити правильність підключення, утримання навантаження та режими мікрокроку без передчасного ускладнення програмної частини.

Окремо висвітлено технологічні аспекти виготовлення навантажених деталей методом 3D-друку, питання жорсткості вузлів, вибору валів, підшипникових опор і ремінних передач, а також практичні обмеження, які впливають на кінцеву точність, плавність руху та надійність роботи системи. Розглянуто вимоги до електробезпеки, організації стендових випробувань і безпечної роботи з мережевою напругою, інструментом та металевим пилом під час механічної доробки компонентів.

Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого розвитку навчального, лабораторного або прикладного робототехнічного комплексу з модульним кінцевим виконавчим органом.

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра містить 4 розділи, висновки, перелік джерел інформації та 2 додатки.

Ключові слова: роботизований маніпулятор, кроковий двигун, ремінна редукція, 3D-друк, DM556, Octopus V1.1, система керування.

SUMMARY

The summary presents the development of a five-axis robotic manipulator with 3D-printed structural elements and stepper-motor drives. The project is focused on a pragmatic low-cost laboratory prototype rather than on a complete industrial system.

The document describes the mechanical architecture of the manipulator, the selected NEMA 23 and NEMA 17 motors, the use of DM542 and DM556 drivers, the BIGTREETECH Octopus V1.1 control board, and the bench testing of STEP/DIR control circuits.

Special attention is given to the realistic limitations of printed load-bearing parts, belt reduction, shaft and bearing selection, power supply wiring, staged commissioning, and the possibility of further expansion of the manipulator into a complete multi-axis system.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
Розділ 1. Аналіз задачі дослідження	11
1.1 Опис предметного середовища.....	11
1.2 Опис обмежень та декомпозиція задачі дослідження	13
1.3 Огляд наявних аналогів.....	15
1.4 Постановка задачі на розробку робототехнічної системи	18
Висновки до розділу 1.....	20
Розділ 2. Аналітичний розділ	22
2.1 Аналіз предметної області та вибір кінематичної схеми	22
2.2 Оцінка навантажень і вибір приводів.....	24
2.3 Аналіз ремінної передачі, валів і підшипникових вузлів.....	27
2.4 Аналіз системи керування та силової електроніки.....	29
2.5 Методика проєктування системи та критерії ефективності.....	32
Висновки до розділу 2.....	34
Розділ 3. Технічне та програмне забезпечення роботизованої системи.....	36
3.1 Загальна структура розробленого програмно-технічного комплексу ...	36
3.2 Опис механічної частини маніпулятора.....	38
3.3 Обґрунтування вибору електронних компонентів	40
3.4 Опис схеми підключення та живлення	43
3.5 Налаштування драйверів і режимів мікрокроку	45
3.6 Опис програмного забезпечення та алгоритмів керування.....	48
3.7 Експериментальний стенд та результати випробувань	52
Висновки до розділу 3.....	55
Розділ 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	57
4.1 Організаційно-правові основи забезпечення безпеки праці	
4.2 Характеристика об'єкта та виявлення потенційних небезпек	
4.3 Дослідження ризику реалізації потенційних небезпек на об'єкті проєктування та розробка заходів щодо їх попередження	

Висновки до розділу 4	
ВИСНОВКИ	68
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ	70
ДОДАТОК А	73
ДОДАТОК Б	75

Вступ

На відміну від надто узагальнених академічних описів роботизованих систем, у даній роботі основний акцент зроблено на реально зібраному апаратному вузлі, який був перевірений на стенді. Це означає, що пояснювальна записка орієнтована не тільки на теоретичне обґрунтування, а й на практичний аналіз вузлів, які фактично були виготовлені, зібрані та перевірені. Такий підхід дозволяє відокремити рішення, що реально працюють у межах студентського проєкту, від тих, що залишаються лише перспективними напрямками подальшого розвитку.

Практична цінність роботи полягає також у тому, що конструкція маніпулятора спирається на доступні компоненти, які можна придбати без спеціалізованого промислового постачання: крокові двигуни стандартних типорозмірів, зовнішні драйвери, масові джерела живлення, друковані полімерні деталі, ремінні передачі, вали та підшипники. У сукупності це формує основу для недорогого робототехнічного комплексу, придатного для навчального, дослідницького та прототипного застосування.

Актуальність теми випускної кваліфікаційної роботи зумовлена стійким зростанням ролі малогабаритних роботизованих систем у сучасному виробництві, лабораторній практиці, сервісному обслуговуванні та навчальному процесі. Для багатьох інженерних задач на перший план виходить не максимальна вантажопідйомність, а точність, модульність, ремонтпридатність, можливість швидкого виготовлення деталей та доступність компонентів. Саме тому інтерес до роботизованих маніпуляторів, виконаних на базі крокових двигунів і 3D-друкованих конструктивних елементів, постійно зростає. Подібні системи дають змогу поєднати механічну гнучкість, відносно невисоку вартість та достатню точність позиціонування, що робить їх придатними як для навчальних стендів, так і для реальних дослідницьких та прикладних задач.

Окремого значення тема набуває в умовах потреби у швидкому прототипуванні технічних рішень. На відміну від класичних промислових

маніпуляторів, виготовлення яких вимагає дорогих матеріалів, складного металообробного обладнання та тривалого циклу доведення, 3D-друкований маніпулятор може бути спроектований, виготовлений, модифікований і повторно зібраний у стислі терміни. Це дозволяє проводити експерименти з кінематикою, приводами, алгоритмами керування та кінцевими виконавчими модулями без надмірних витрат. Для університетського середовища та інженерної підготовки такий підхід є особливо важливим, оскільки поєднує дослідницьку, конструкторську та програмну складові в одному проєкті.

Ступінь розробленості теми свідчить про наявність значної кількості як промислових, так і напівпрофесійних рішень. Промислові маніпулятори переважно будуються на сервоприводах, редукторах високої точності, замкнених системах зворотного зв'язку та жорстких металевих конструкціях. Водночас у сегменті малогабаритних установок широко застосовуються крокові двигуни, ремінні передачі, універсальні драйвери STEP/DIR та мікроконтролерні або комп'ютерно-інтегровані системи керування. Досвід відкритих інженерних проєктів підтверджує, що при правильному виборі механічної схеми, передаточних чисел і режимів мікрокроку крокові приводи здатні забезпечити стабільну роботу багатовісної конструкції без надмірного ускладнення електронної частини.

Метою роботи є розробка та дослідження п'ятиосьового роботизованого маніпулятора з друкованими конструктивними елементами на основі крокових двигунів, призначеного для позиціювання легкого функціонального модуля в робочому просторі. У межах роботи розглядається не лише механічна структура маніпулятора, але й силова електроніка, система живлення, принципи формування керуючих сигналів, експериментальна перевірка працездатності окремих осей і оцінка можливостей системи як універсальної мехатронної платформи.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати такі завдання: проаналізувати сучасний стан малогабаритних роботизованих маніпуляторів; обґрунтувати вибір п'ятиосьової кінематичної структури;

визначити вимоги до механічної жорсткості та вантажопідйомності; виконати вибір крокових двигунів, драйверів, джерел живлення та плати керування; розробити механічні вузли на базі 3D-друкованих деталей, ремінних передач, валів і підшипників; побудувати експериментальний стенд для перевірки роботи приводів; визначити доцільні сфери застосування маніпулятора; сформулювати рекомендації щодо подальшого вдосконалення конструкції.

Об'єктом дослідження є процес побудови та функціонування п'ятиосьового роботизованого маніпулятора з кроковими приводами. Предметом дослідження виступають методи та засоби конструювання механічної частини, вибору електромеханічних компонентів і організації системи керування багатовісним маніпулятором з друкованими конструктивними елементами. Методи дослідження охоплюють аналіз науково-технічної літератури, кінематичний і конструктивний аналіз, оціночні розрахунки моментів навантаження, експериментальні випробування приводів, а також узагальнення отриманих результатів для подальшого впровадження у завершений дипломний проєкт.

Практичне значення роботи полягає у створенні реальної експериментальної бази для подальшого розвитку проєкту маніпулятора. Отримані результати можуть бути використані для побудови навчально-демонстраційного стенда, платформи для відпрацювання алгоритмів керування, а також для реалізації універсального модульного кінцевого вузла під задачі інспекції, позиціонування легкого інструмента або сенсорного модуля. Наукова новизна полягає у комплексному поєднанні доступної технології 3D-друку, ремінної редукції, зовнішніх драйверів крокових двигунів та модульної архітектури п'ятиосьової системи в єдиному експериментальному рішенні, придатному для подальшого масштабування.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Опис предметного середовища

Для такого класу систем ключовими є не лише геометричні можливості маніпулятора, але й здатність утримувати навантаження в статичних положеннях, працювати з помірною швидкістю без пропуску кроків та залишатися ремонтпридатним після багаторазових стендових запусків. Саме тому при розгляді предметного середовища доцільно враховувати не лише кінематичну свободу, а й матеріаломісткість, доступність комплектуючих та технологічність виготовлення.

Додатковою особливістю предметного середовища є використання комбінованої конструкції, у якій силові та високонавантажені вузли поєднуються з 3D-друкованими деталями. Такий підхід дозволяє швидко вносити зміни в геометрію ланок та опорних елементів, однак вимагає окремого аналізу жорсткості, напрямків шарів друку, типу пластику та допустимих локальних напружень у місцях кріплення підшипників, валів і двигунів.

У межах підрозділу «1.1 Опис предметного середовища» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій малогабаритний маніпулятор розглядається як універсальна платформа позиціонування легкого модуля. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки п'ять ступенів свободи виправдані потребою не лише досягнення точки, а й орієнтації інструмента. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Інженерний аналіз показує, що найбільш навантажені осі повинні бути винесені ближче до основи, а кінцеві вузли максимально полегшені. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей,

силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціонування легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

Слід врахувати, що доступність компонентів і ремонтпридатність є не менш важливими, ніж абсолютна точність. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Суттєвим є також положення про те, що п'ять ступенів свободи виправдані потребою не лише досягнення точки, а й орієнтації інструмента. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Аналіз показує, що найбільш навантажені осі повинні бути винесені ближче до основи, а кінцеві вузли максимально полегшені. При цьому завданням роботи не є копіювання промислового робота, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проєктування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж

застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

Отже, доступність компонентів і ремонтпридатність є не менш важливими, ніж абсолютна точність, малогабаритний маніпулятор розглядається як універсальна платформа позиціонування легкого модуля та п'ять ступенів свободи виправдані потребою не лише досягнення точки, а й орієнтації інструмента разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проекту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Ostorus та силових драйверів DM542/DM556.

1.2 Опис обмежень та декомпозиція задачі дослідження

У межах практичного проекту суттєвим обмеженням є також часовий ресурс на виготовлення та налагодження. З цієї причини система розвивається поетапно: спочатку відпрацьовується силова частина та окремі осі, далі виконується перевірка базової осі із ремінною редукцією, після чого формується логіка інтеграції всіх приводів у єдиний комплекс. Така декомпозиція є не недоліком, а раціональною методикою зменшення технічного ризику.

До організаційних обмежень належить також необхідність безпечної роботи з мережею 230 В, відкритими металевими корпусами блоків живлення та елементами стенда. Це зумовлює вимогу до чіткого поділу мережевої, силової та сигнальної частин, а також до поетапного пуску системи за принципом: окремо блок живлення, окремо драйвер, окремо двигун, окремо сигнальна частина.

У межах підрозділу «1.2 Опис обмежень та декомпозиція задачі дослідження» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій друковані деталі мають обмеження за жорсткістю,

теплостійкістю та точністю посадок. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки крокові двигуни працюють у відкритому контурі і вимагають раціонального вибору прискорень та мікрокроку. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

З інженерної позиції видно, що мережевий монтаж 230 В формує окрему групу ризиків і не може розглядатись як другорядна частина проєкту. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціювання легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

Необхідно брати до уваги, що межі бакалаврської роботи повинні бути визначені чесно: створюється платформа, а не серійний промисловий робот. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Окремо слід відзначити, що крокові двигуни працюють у відкритому контурі і вимагають раціонального вибору прискорень та мікрокроку. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно

виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Проведені розрахунки засвідчують, що мережевий монтаж 230 В формує окрему групу ризиків і не може розглядатись як другорядна частина проєкту. При цьому завданням роботи не є копіювання промислового робота, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проєктування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

У підсумку можна зазначити, що межі бакалаврської роботи повинні бути визначені чесно: створюється платформа, а не серійний промисловий робот, друковані деталі мають обмеження за жорсткістю, теплостійкістю та точністю посадок та крокові двигуни працюють у відкритому контурі і вимагають раціонального вибору прискорень та мікрокроку разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проєкту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Octopus та силових драйверів DM542/DM556.

1.3 Огляд наявних аналогів

Серед відкритих і напівпрофесійних проєктів особливий інтерес становлять 3D-друковані маніпулятори, в яких друк використовують не для декоративних кожухів, а для силових та геометрично складних деталей. Такі рішення демонструють, що при правильному підборі товщин стінок, кількості периметрів, заповнення та металевих вставок можна отримати придатну

жорсткість для навчальних і дослідницьких робототехнічних систем без фрезерування всіх елементів із металу.



Рис. 1.1 - Приклад аналогу

Однак більшість відкритих конструкцій не містить достатньо докладного аналізу навантажень, підбору ремінної редукції або межі застосування конкретних двигунів. Через це в них часто недооцінюються питання утримання маси руки у горизонтальному положенні, вплив ваги кабелів на кінцеві ланки та важливість жорсткого кріплення підшипникових вузлів. У даній роботі ці практичні аспекти враховано окремо.

У межах підрозділу «1.3 Огляд наявних аналогів» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій промислові маніпулятори демонструють високий рівень зрілості, але є надмірними за складністю та вартістю. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки освітні настільні маніпулятори доступні, однак часто програють у жорсткості й реальному моменті на осях. На практиці саме тут

формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Практичний аналіз конструкції свідчить, що архітектура на базі плати керування та зовнішніх драйверів наближає систему до дорослого підходу. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціювання легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

У проєкті принципово, що власна конструкція виправдана потребою поєднати доступність, модульність і практичну працездатність. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Також необхідно підкреслити, що освітні настільні маніпулятори доступні, однак часто програють у жорсткості й реальному моменті на осях. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку,

безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Оцінювання параметрів підтверджує, що архітектура на базі плати керування та зовнішніх драйверів наближає систему до дорослого підходу. При цьому завданням роботи не є копіювання промислового робота, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проектування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

Таким чином, власна конструкція виправдана потребою поєднати доступність, модульність і практичну працездатність, промислові маніпулятори демонструють високий рівень зрілості, але є надмірними за складністю та вартістю та освітні настільні маніпулятори доступні, однак часто програють у жорсткості й реальному моменті на осях разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проекту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Octopus та силових драйверів DM542/DM556.

1.4 Постановка задачі на розробку робототехнічної системи

Практика налагодження показує, що у рамках бакалаврської роботи доцільно ставити реалістичну задачу: не створення завершеного промислового робота, а розробку та експериментальну перевірку функціонального п'ятиосьового маніпулятора з працездатною силовою частиною, раціональною механічною структурою, підготовленою платформою керування та модульною архітектурою для подальшого розвитку.

У межах підрозділу «1.4 Постановка задачі на розробку робототехнічної системи» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-

друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій потрібно створити п'ятиосьову робототехнічну платформу з друкованими несучими вузлами та кроковими приводами. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки маніпулятор повинен мати достатню жорсткість для встановлення легкого функціонального модуля. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Для даної системи принципово, що ключовим критерієм успішності є реальна працездатність навантаженої осі під час стендових випробувань. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціювання легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

Для коректної роботи системи важливо, що побудована система повинна створити основу для подальшої інтеграції програмних режимів і датчиків. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Додатково варто наголосити, що маніпулятор повинен мати достатню жорсткість для встановлення легкого функціонального модуля. Порівняно з

типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Експериментальна перевірка показала, що ключовим критерієм успішності є реальна працездатність навантаженої осі під час стендових випробувань. При цьому завданням роботи не є копіювання промислової роботи, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проектування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

Підсумок аналізу полягає в тому, що побудована система повинна створити основу для подальшої інтеграції програмних режимів і датчиків, потрібно створити п'ятиосьову робототехнічну платформу з друкованими несучими вузлами та кроковими приводами та маніпулятор повинен мати достатню жорсткість для встановлення легкого функціонального модуля разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проєкту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Ostorus та силових драйверів DM542/DM556.

Висновки до розділу 1

У межах підрозділу «Висновки до розділу 1» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій сформовано предметне середовище та визначено місце проєкту серед

доступних аналогів. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки встановлено ключові конструктивні, електромеханічні та технологічні обмеження. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Конструктивний аналіз підтверджує, що модульність і доступність обрано базовими інженерними принципами. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціонування легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Аналіз предметної області та вибір кінематичної схеми

Вибір п'ятиосьової конфігурації пояснюється тим, що для більшості прикладних операцій недостатньо лише вивести кінець маніпулятора в потрібну точку простору. Не менш важливо зорієнтувати робочий модуль під певним кутом до поверхні, особливо якщо надалі система розглядатиметься як платформа для інспекційної головки, легкого технологічного інструмента або модульного сенсорного вузла. Тому п'ять ступенів свободи є компромісом між функціональністю та конструктивною складністю.

При цьому базова вісь сприймає найбільший перекидний момент від усіх верхніх ланок. Саме тому для неї застосовується посилений підхід: двигун NEMA 23, ремінна редукція 1:4, масивніший вал та підшипникові опори. Для верхніх осей, де важливіше зменшити інерцію рухомих ланок, використовуються компактніші NEMA 17, у тому числі тонкі pancake-варіанти. Така диференціація приводів відповідає реальному розподілу навантажень у конструкції.

У межах підрозділу «2.1 Аналіз предметної області та вибір кінематичної схеми» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій послідовна п'ятиосьова структура є найраціональнішою для компактного лабораторного маніпулятора. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки п'ять осей забезпечують компроміс між функціональністю і допустимою складністю. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Інженерний аналіз показує, що робоча зона визначається не лише геометрією, а й реально доступним моментом на плечовій осі. У даному

проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціонування легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

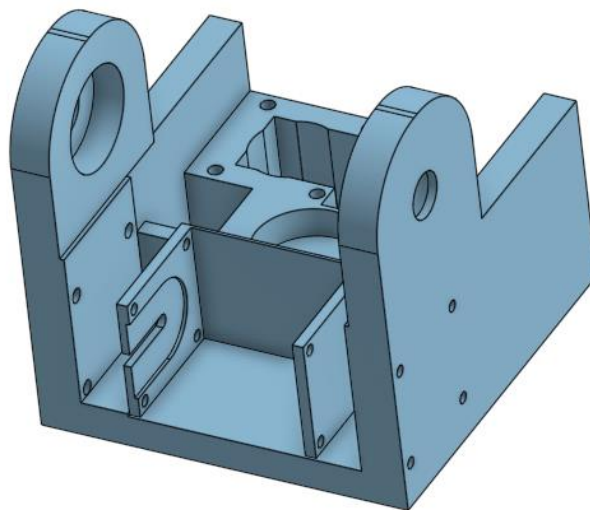


Рис. 2.1 - 3д-модель частини маніпулятора

Слід врахувати, що вибір кінематики має враховувати як досяжність точки, так і зручність підходу до неї. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Не менш важливим є те, що п'ять осей забезпечують компроміс між функціональністю і допустимою складністю. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Розгляд конструкції та режимів роботи підтверджує, що робоча зона визначається не лише геометрією, а й реально доступним моментом на плечовій осі. При цьому завданням роботи не є копіювання промислової роботи, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проектування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

Узагальнюючи викладене, вибір кінематики має враховувати як досяжність точки, так і зручність підходу до неї, послідовна п'ятиосьова структура є найраціональнішою для компактного лабораторного маніпулятора та п'ять осей забезпечують компроміс між функціональністю і допустимою складністю разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проекту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Ostorus та силових драйверів DM542/DM556.

2.2 Оцінка навантажень і вибір приводів

Експериментальна оцінка показала, що сумарна маса друкованих елементів, двигунів, валів і підшипникових вузлів верхньої частини руки формує для базової осі відчутний момент навантаження. Навіть без

урахування корисного навантаження на кінці руки це створює вимогу до наявності запасу моменту, достатнього не тільки для статичного утримання, а й для плавного запуску та зупинки без втрати кроків. Саме тому пряме з'єднання базового двигуна з вихідною віссю було б недостатньо раціональним.

Застосована ремінна редукція з малою шестернею на валу двигуна та великим шківом на осі плеча збільшує доступний момент приблизно у чотири рази та одночасно зменшує швидкість вихідної осі. Для лабораторного маніпулятора це є позитивною властивістю, оскільки пріоритет віддається не високій швидкості, а стабільності, відсутності ривків і можливості точного позиціонування.

Оцінювання приводів верхніх осей здійснювалося з іншими критеріями: мінімізація маси, достатність моменту для локальних обертань та сумісність із компактною друкованою геометрією. У результаті для частини вузлів було обрано стандартні NEMA 17, а для найбільш віддалених і малонавантажених ланок – тонкі рапсаке-модифікації, що зменшують інерційний момент кінця руки.

У межах підрозділу «2.2 Оцінка навантажень і вибір приводів» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій плечова вісь працює з сумарною масою приблизно 1,0–1,2 кг при плечі близько 0,28 м. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки статичний момент на навантаженій осі становить близько 2,8–3,3 Н·м без урахування динаміки. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

З інженерної позиції видно, що ремінна передача 1:4 підвищує момент на виході до приблизно 6,5–7 Н·м з урахуванням втрат. У даному проєкті це

реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціонування легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

Необхідно брати до уваги, що при виборі двигунів важливо враховувати не тільки holding torque, а й поведінку в русі та на мікрокроці. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Суттєвим є також положення про те, що статичний момент на навантаженій осі становить близько 2,8–3,3 Н·м без урахування динаміки. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Аналіз показує, що ремінна передача 1:4 підвищує момент на виході до приблизно 6,5–7 Н·м з урахуванням втрат. При цьому завданням роботи не є копіювання промислового робота, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проєктування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж застосування. Саме цим

пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

Отже, при виборі двигунів важливо враховувати не тільки holding torque, а й поведінку в русі та на мікрокроці, плечова вісь працює з сумарною масою приблизно 1,0–1,2 кг при плечі близько 0,28 м та статичний момент на навантаженій осі становить близько 2,8–3,3 Н·м без урахування динаміки разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проєкту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Ostorus та силових драйверів DM542/DM556.

2.3 Аналіз ремінної передачі, валів і підшипникових вузлів

У проєкті використано сталеві вали діаметром 10 мм і підшипники з внутрішнім діаметром 10 мм та зовнішнім 28 мм. Такий вибір обумовлений поєднанням доступності стандартних комплектуючих, достатньої жорсткості та придатності для монтажу у друковані опорні деталі. При цьому особливу увагу необхідно приділяти посадкам: надто щільна посадка утруднює складання, а надто вільна призводить до люфтів і перекосу осі.

Практика складання показала, що для друкованих деталей реальний розмір посадочного місця часто потребує корекції з урахуванням особливостей конкретного пластику та налаштувань принтера. Це означає, що проєктування підшипникового вузла не може зводитися лише до номінального креслення; необхідно закладати можливість технологічного допасування або коригування моделі перед друком остаточної версії.

Ремінна передача, крім збільшення моменту, виконує ще одну корисну функцію: частково розв'язує двигун і навантажену вісь за ударними моментами. Це робить систему більш м'якою в запуску та зменшує ризик різкого зриву кроків під час експериментів із частотою імпульсів і мікрокроком.

У межах підрозділу «2.3 Аналіз ремінної передачі, валів і підшипникових вузлів» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій ремінна передача дозволяє збільшити момент, зменшити швидкість та винести двигун із зони шарніра. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки схема 20T–80T є раціональним компромісом для навантаженої осі лабораторного маніпулятора. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Практичний аналіз конструкції свідчить, що точність друкованих посадок безпосередньо впливає на відсутність люфту й плавність руху. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціювання легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

У проєкті принципово, що підшипниковий вузол є рівнозначним за важливістю самому вибору двигуна. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Окремо слід відзначити, що схема 20Т–80Т є раціональним компромісом для навантаженої осі лабораторного маніпулятора. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Проведені розрахунки засвідчують, що точність друкованих посадок безпосередньо впливає на відсутність люфту й плавність руху. При цьому завданням роботи не є копіювання промислового робота, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проектування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

У підсумку можна зазначити, що підшипниковий вузол є рівнозначним за важливістю самому вибору двигуна, ремінна передача дозволяє збільшити момент, зменшити швидкість та винести двигун із зони шарніра та схема 20Т–80Т є раціональним компромісом для навантаженої осі лабораторного маніпулятора разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проекту п'ятиосового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Ostorus та силових драйверів DM542/DM556.

2.4 Аналіз системи керування та силової електроніки

Для потужніших осей у роботі застосовано зовнішні драйвери класу DM556, а для менш навантажених – DM542. Такий підхід є більш раціональним, ніж спроба керувати всіма двигунами безпосередньо зі штатних

малопотужних драйверів контролера. Використання окремих драйверів дає можливість налаштовувати струм та мікрокрок під конкретний двигун і конкретну вісь, що особливо важливо для неоднорідної за навантаженням багатовісної системи.

Керувальні сигнали STEP/DIR є достатніми для базового запуску і відповідають практиці побудови багатьох CNC- та робототехнічних систем. На етапі первинного налагодження доцільним виявилось використання окремого генератора імпульсів, що дозволило перевірити коректність обмоток двигуна, утримання під навантаженням, зміну напрямку обертання та реакцію на різні частоти без додаткової невизначеності, пов'язаної з програмним забезпеченням верхнього рівня.

Розділення джерел живлення на 48 В для драйверів силових осей та 24 В для допоміжних модулів і логіки є прагматичним рішенням, яке спрощує сумісність обладнання і знижує ризик помилок на етапі налагодження. Воно також дозволяє надалі розділити силову та керуючу частини і зменшити вплив силових перешкод на сигнальні лінії.

У межах підрозділу «2.4 Аналіз системи керування та силової електроніки» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій плата BIGTREETECH Octopus V1.1 забезпечує гнучку багатоканальну основу для формування STEP/DIR. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки силові осі доцільно підключати через зовнішні драйвери DM556, а легші осі — через DM542. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Для даної системи принципово, що якість мережевого монтажу визначає безпечність і надійність всієї установки. У даному проєкті це реалізовано через

використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціонування легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

Практика налагодження показує, що поєднане тестування є найефективнішим методом первинного налагодження. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Також необхідно підкреслити, що силові осі доцільно підключати через зовнішні драйвери DM556, а легші осі — через DM542. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Оцінювання параметрів підтверджує, що якість мережевого монтажу визначає безпечність і надійність всієї установки. При цьому завданням роботи не є копіювання промислового робота, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проєктування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж

застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

Таким чином, поєднання тестування є найефективнішим методом первинного налагодження, плата BIGTREE TECH Octopus V1.1 забезпечує гнучку багатоканальну основу для формування STEP/DIR та силові осі доцільно підключати через зовнішні драйвери DM556, а легші осі — через DM542 разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проєкту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Octopus та силових драйверів DM542/DM556.

2.5 Методика проєктування системи та критерії ефективності

Критерії ефективності для розроблюваного маніпулятора повинні оцінюватися не абстрактно, а через конкретні експериментальні ознаки: здатність базової осі надійно утримувати руку у статичному положенні, плавність зміни напрямку, відсутність самовільного зсуву під навантаженням, повторюваність руху після кількох циклів та допустимий тепловий режим драйверів і двигунів. Саме такі критерії є найбільш корисними для бакалаврського проєкту, який спирається на реальний стенд.

Запропонована методика проєктування фактично базується на ітераційному циклі: розрахунок – 3D-моделювання – друк – складання – стендовий запуск – корекція моделі. Для друкованого мехатронного виробу такий цикл є природним і дозволяє швидко виявляти слабкі місця конструкції без повного перероблення всього виробу.

У межах підрозділу «2.5 Методика проєктування системи та критерії ефективності» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій проєктування має йти від функціональних вимог до конкретних вузлів і режимів запуску. Для даного проєкту це має визначальне значення,

оскільки критеріями ефективності виступають працездатність, жорсткість, безпечність і технологічність. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Конструктивний аналіз підтверджує, що поетапний запуск від блока живлення до навантаженої осі мінімізує ризики відмови. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціонування легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

Для коректної роботи системи важливо, що аналітичне обґрунтування має безпосередньо переходити в конструктивні рішення третього розділу. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Додатково варто наголосити, що критеріями ефективності виступають працездатність, жорсткість, безпечність і технологічність. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на

навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Експериментальна перевірка показала, що поетапний запуск від блока живлення до навантаженої осі мінімізує ризики відмови. При цьому завданням роботи не є копіювання промислового робота, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проектування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

Підсумок аналізу полягає в тому, що аналітичне обґрунтування має безпосередньо переходити в конструктивні рішення третього розділу, проектування має йти від функціональних вимог до конкретних вузлів і режимів запуску та критеріями ефективності виступають працездатність, жорсткість, безпечність і технологічність разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проекту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Octopus та силових драйверів DM542/DM556.

Висновки до розділу 2

У межах підрозділу «Висновки до розділу 2» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій аналітичний розділ підтвердив доцільність вибраної кінематичної схеми. Для даного проекту це має визначальне значення, оскільки вибір приводів і редукції має достатнє обґрунтування за моментом. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз

показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Інженерний аналіз показує, що електронна архітектура відповідає задачі багатовісного керування. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціювання легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Загальна структура розробленого програмно-технічного комплексу

Розроблений комплекс доцільно розглядати як багаторівневу систему. На нижньому рівні розташовані драйвери, джерела живлення, двигуни та комутація; на середньому – контролер або генератор сигналів STEP/DIR; на верхньому – логіка керування, яка може бути реалізована на платі Ocoporus, зовнішньому мікроконтролері або персональному комп'ютері. Така архітектура дозволяє проводити налагодження послідовно, не ускладнюючи проект передчасною інтеграцією всіх компонентів.

У поточному стані проєкту повністю відпрацьовано силову частину базової осі та перевірено реакцію системи на зовнішній генератор імпульсів. Це є важливим практичним результатом, оскільки підтверджує правильність вибору двигуна, драйвера, полярності обмоток, ремінної редукції та джерела живлення. Інтеграція з платою Ocoporus розглядається як наступний логічний етап розвитку системи керування.

У межах підрозділу «3.1 Загальна структура розробленого програмно-технічного комплексу» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій розроблений комплекс має модульну структуру і дозволяє запускати осі поетапно. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки механічна частина, силова електроніка і логіка керування утворюють єдину систему. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

З інженерної позиції видно, що конструкція орієнтована на встановлення змінного кінцевого модуля. У даному проєкті це реалізовано через

використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціонування легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

Слід врахувати, що загальна архітектура придатна до подальшого масштабування. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Не менш важливим є те, що механічна частина, силова електроніка і логіка керування утворюють єдину систему. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Розгляд конструкції та режимів роботи підтверджує, що конструкція орієнтована на встановлення змінного кінцевого модуля. При цьому завданням роботи не є копіювання промислового робота, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проєктування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж

застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

Узагальнюючи викладене, загальна архітектура придатна до подальшого масштабування, розроблений комплекс має модульну структуру і дозволяє запускати осі поетапно та механічна частина, силова електроніка і логіка керування утворюють єдину систему разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проєкту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Octopus та силових драйверів DM542/DM556.

3.2 Опис механічної частини маніпулятора

Механічна частина побудована за модульним принципом. Базовий модуль відповідає за підйом та поворот найбільш навантаженої ланки, а верхні модулі формують геометрію робочого простору та орієнтацію кінцевого вузла. Модульність дає змогу замінювати окремі друковані деталі без повної переробки всієї конструкції й поступово модернізувати систему.

Суттєвою особливістю є те, що конструкція не орієнтована на надмірну швидкість. Навпаки, геометрія та приводи підібрані таким чином, щоб забезпечити передбачувану та контрольовану роботу в умовах стендового експерименту. Такий підхід є прагматичним для навчального та дослідницького проєкту, оскільки зменшує вірогідність механічних перевантажень і спрощує відпрацювання алгоритмів.

У межах підрозділу «3.2 Опис механічної частини маніпулятора» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій механічні вузли будуються як окремі модулі з друкованими корпусами й стандартними компонентами. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки базовий вузол сприймає сумарне навантаження і тому має

бути найбільш жорстким. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Практичний аналіз конструкції свідчить, що дистальні вузли зап'ястя повинні бути легкими та компактними. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціонування легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

Необхідно брати до уваги, що комбінація друкованих і стандартних елементів є найбільш раціональною для проєкту. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Суттєвим є також положення про те, що базовий вузол сприймає сумарне навантаження і тому має бути найбільш жорстким. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Аналіз показує, що дистальні вузли зап'ястя повинні бути легкими та компактними. При цьому завданням роботи не є копіювання промислового робота, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проектування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

Отже, комбінація друкованих і стандартних елементів є найбільш раціональною для проекту, механічні вузли будуються як окремі модулі з друкованими корпусами й стандартними компонентами та базовий вузол сприймає сумарне навантаження і тому має бути найбільш жорстким разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проекту п'ятиосового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Octopus та силових драйверів DM542/DM556.

3.3 Обґрунтування вибору електронних компонентів

Вибір конкретних компонентів визначався не лише номінальними паспортними даними, а й практичною доступністю, сумісністю та можливістю швидкої перевірки на реальному стенді. Зокрема, драйвер DM556 для базової осі є доцільним через більший допустимий струм та кращу придатність до роботи з потужнішим NEMA 23, тоді як для менш навантажених осей можуть використовуватись DM542, де надлишковий запас по струму вже не є необхідним.

Плата BIGTREETECH Octopus V1.1 була обрана як перспективна керувальна платформа завдяки великій кількості виходів, підтримці кількох осей, наявності розвиненої екосистеми та придатності до інтеграції у багатовісний стенд. Разом з тим, для прагматичної розробки було прийняте

рішення спочатку не перевантажувати систему складною прошивкою, а відпрацювати силову частину окремо.

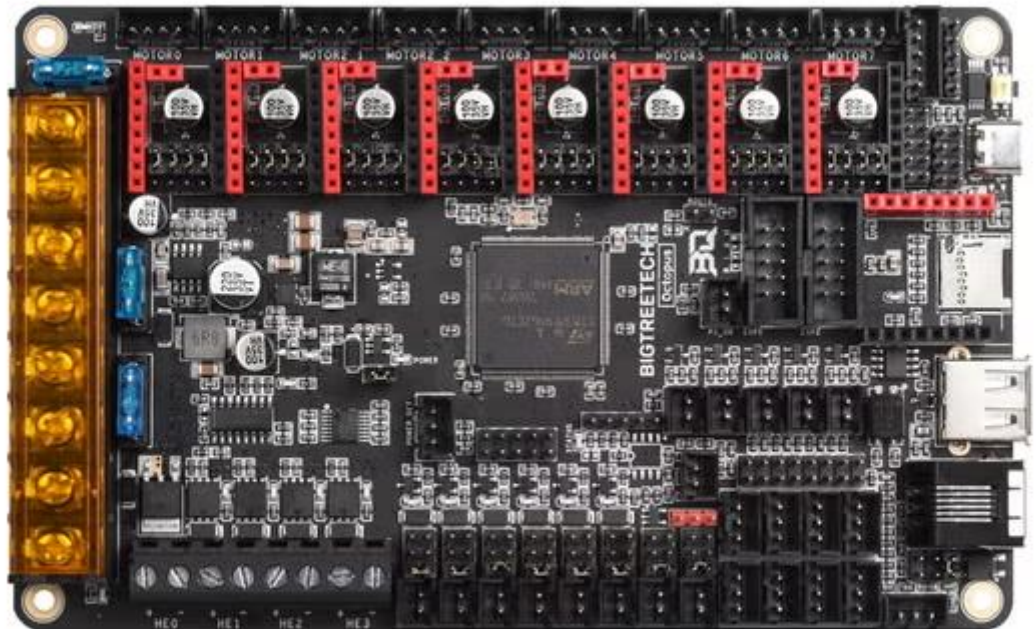


Рис. 3.1 - Плата BIGTREETECH Octopus V1.1

У межах підрозділу «3.3 Обґрунтування вибору електронних компонентів» доцільно розглянути п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій DM556 є оптимальними для силових осей з NEMA 23. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки DM542 придатні для осей з меншим струмом і моментом. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Для даної системи принципово, що 48 В доцільно використовувати для драйверів, а нижчу напругу — для логічної частини. У даному проєкті це

реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціонування легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

У проєкті принципово, що генератор імпульсів є корисним допоміжним засобом для стендової відладки. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Окремо слід відзначити, що DM542 придатні для осей з меншим струмом і моментом. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Проведені розрахунки засвідчують, що 48 В доцільно використовувати для драйверів, а нижчу напругу — для логічної частини. При цьому завданням роботи не є копіювання промислового робота, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проєктування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж

застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

У підсумку можна зазначити, що генератор імпульсів є корисним допоміжним засобом для стендової відладки, DM556 є оптимальними для силових осей з NEMA 23 та DM542 придатні для осей з меншим струмом і моментом разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проєкту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Ostopus та силових драйверів DM542/DM556.

3.4 Опис схеми підключення та живлення

Практика стендового запуску показала, що найбільшу кількість ризиків становить саме мережева частина. Неправильне підключення мережевого вводу, відсутність захисного провідника або неякісно обтиснуті наконечники можуть призводити до аварійного спрацювання захисту, а в гіршому випадку – до пошкодження обладнання. Тому в роботі окремо підкреслюється необхідність використання трижильного кабелю з коректним підключенням PE, N і L та поетапної перевірки блоку живлення мультиметром без підключення навантаження.

Для клемних з'єднань доцільно використовувати правильно підібрані наконечники та спеціалізований інструмент обтиску. Це зменшує перехідний опір контакту, запобігає випадковому висмикуванню жили з клеми та підвищує повторюваність монтажу. Для навчального стенда цей аспект є не менш важливим, ніж правильний вибір двигуна або драйвера, оскільки ненадійний монтаж спотворює результати випробувань.

У межах підрозділу «3.4 Опис схеми підключення та живлення» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій мережева, силова та сигнальна частини повинні бути чітко розділені. Для

даного проєкту це має визначальне значення, оскільки підключення L, N і PE має виконуватись тільки через якісні кабелі та клеми. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Конструктивний аналіз підтверджує, що поетапний запуск від блока живлення до двигуна дозволяє безпечно локалізувати несправності. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціювання легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

Практика налагодження показує, що кабелі повинні мати механічне розвантаження й не тягнути клемники драйверів. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Також необхідно підкреслити, що підключення L, N і PE має виконуватись тільки через якісні кабелі та клеми. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність

маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Оцінювання параметрів підтверджує, що поетапний запуск від блока живлення до двигуна дозволяє безпечно локалізувати несправності. При цьому завданням роботи не є копіювання промислового робота, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проектування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

Таким чином, кабелі повинні мати механічне розвантаження й не тягнути клемники драйверів, мережева, силова та сигнальна частини повинні бути чітко розділені та підключення L, N і PE має виконуватись тільки через якісні кабелі та клеми разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проекту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Ostopus та силових драйверів DM542/DM556.

3.5 Налаштування драйверів і режимів мікрокроку

Налаштування мікрокроку та робочого струму слід розглядати як інструмент узгодження драйвера з конкретною механікою, а не як універсальний параметр. Надмірно високий мікрокрок може зробити рух плавним, але ускладнює досягнення достатньої швидкості при обмеженій частоті імпульсів. Занадто великий струм підвищує нагрів без реальної користі, а надто малий – зменшує запас моменту. Тому вибір режиму драйвера повинен спиратися на реальні випробування конкретної осі.

Для базової осі доцільним є підбір режиму, який забезпечує впевнене утримання руки та м'який старт без ривків. Саме тому під час стендових

запусків корисно перевіряти кілька значень мікрокроку та порівнювати не лише відчутну плавність, а й нагрів двигуна, поведінку під навантаженням та чутливість до зміни частоти імпульсів.

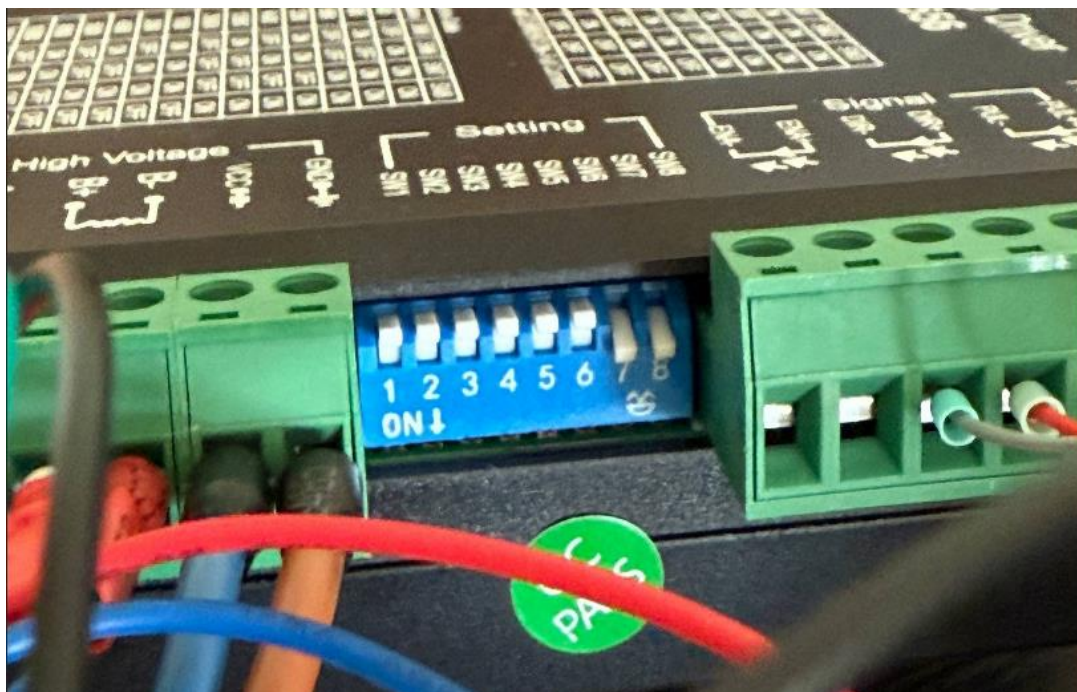


Рис. 3.2 - - Драйвер

У межах підрозділу «3.5 Налаштування драйверів і режимів мікрокроку» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій режими струму та мікрокроку повинні вибиратися з урахуванням реального навантаження. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки для навантаженої осі слід шукати баланс між запасом моменту і тепловим режимом. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Інженерний аналіз показує, що надто дрібний мікрокрок ускладнює відладку без суттєвого приросту якості руху. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціонування легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

Для коректної роботи системи важливо, що налаштування драйвера повинно перевірятися на реальному стенді, а не лише за таблицею. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Додатково варто наголосити, що для навантаженої осі слід шукати баланс між запасом моменту і тепловим режимом. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Експериментальна перевірка показала, що надто дрібний мікрокрок ускладнює відладку без суттєвого приросту якості руху. При цьому завданням роботи не є копіювання промислової роботи, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою

проектування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

Підсумок аналізу полягає в тому, що налаштування драйвера повинно перевірятися на реальному стенді, а не лише за таблицею, режими струму та мікрокроку повинні вибиратися з урахуванням реального навантаження та для навантаженої осі слід шукати баланс між запасом моменту і тепловим режимом разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проєкту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Ostorus та силових драйверів DM542/DM556.

3.6 Опис програмного забезпечення та алгоритмів керування

У поточній стадії проєкту алгоритмічна частина розглядається як поєднання вже перевіреної низькорівневої логіки STEP/DIR і перспективної верхньорівневої системи керування для всієї руки. Це дозволяє формулювати програмне забезпечення не як завершений продукт, а як етапно розвивану частину комплексу: від окремого керування осями до координованого переміщення кількох ланок.

Для подальшого розвитку логіки керування ключовими залишаються задачі збереження параметрів осей, обмеження швидкості й прискорення, гомінгу, синхронізації кількох приводів та формування зрозумілого інтерфейсу для оператора. Опис цих функцій у роботі подається як технічно обґрунтована дорожня карта переходу від окремих стендових тестів до повноцінного багатовісного керування.

У межах підрозділу «3.6 Опис програмного забезпечення та алгоритмів керування» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій архітектура проєкту орієнтується на майбутнє комп'ютерно-

інтегроване керування. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки логіка руху повинна перетворювати кути осей у кроки з урахуванням редукції й мікрокроку. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

З інженерної позиції видно, що плавні профілі розгону й гальмування є критичними для крокових приводів. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціонування легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

Слід врахувати, що програмна частина повинна еволюціонувати разом із механічним розвитком системи. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

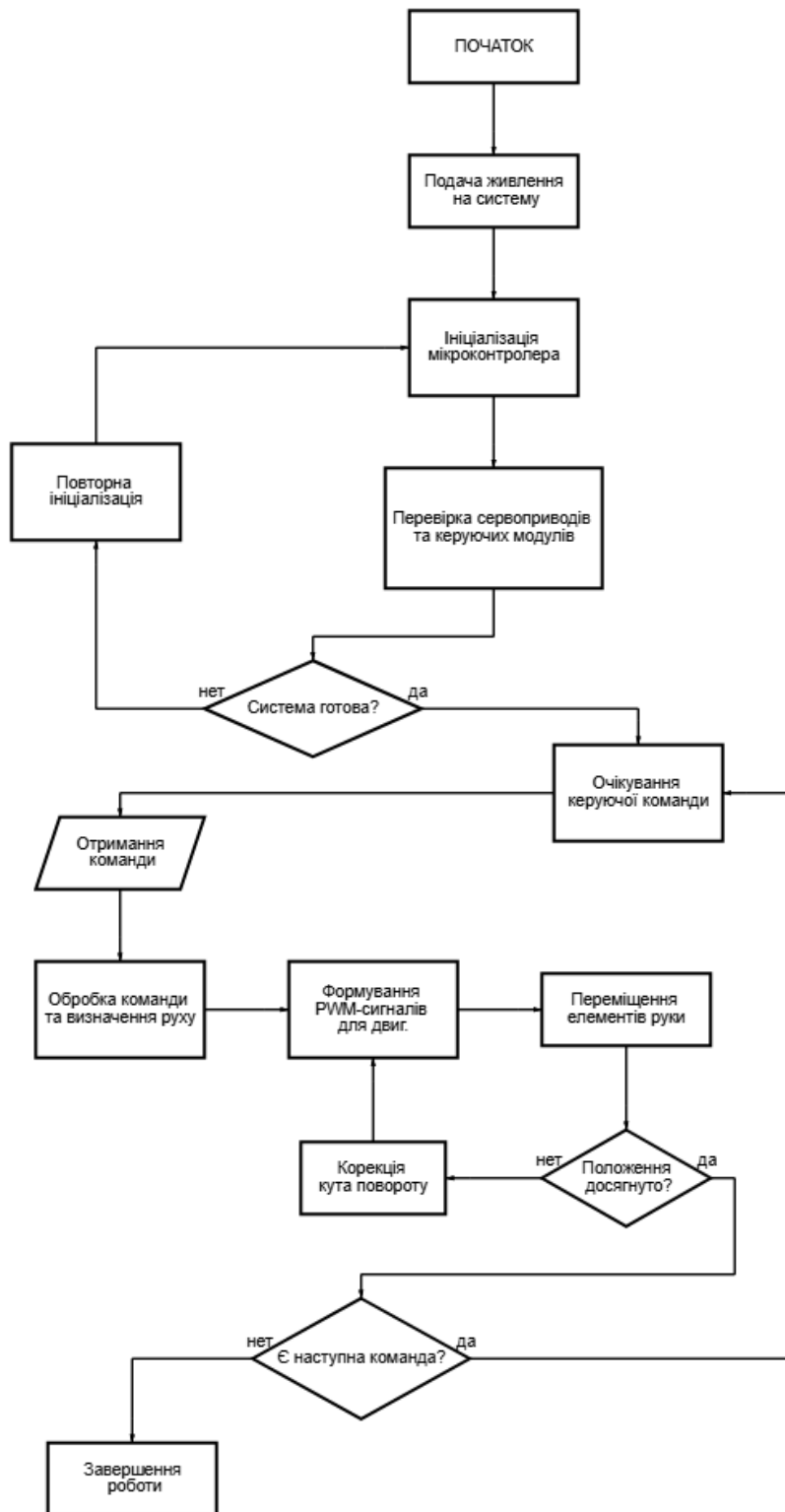


Рис. 3.3 - Блок-схема алгоритму роботи програмної частини моделі руки

Не менш важливим є те, що логіка руху повинна перетворювати кути осей у кроки з урахуванням редукції й мікрокроку. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Розгляд конструкції та режимів роботи підтверджує, що плавні профілі розгону й гальмування є критичними для крокових приводів. При цьому завданням роботи не є копіювання промислового робота, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проектування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

Узагальнюючи викладене, програмна частина повинна еволюціонувати разом із механічним розвитком системи, архітектура проекту орієнтується на майбутнє комп'ютерно-інтегроване керування та логіка руху повинна перетворювати кути осей у кроки з урахуванням редукції й мікрокроку разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проекту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Octopus та силових драйверів DM542/DM556.

3.7 Експериментальний стенд та результати випробувань

Під час експериментів було послідовно перевірено: працездатність блоку живлення без навантаження; подачу напруги на драйвер; правильність визначення пар обмоток крокового двигуна; режим утримання вала під струмом; роботу генератора імпульсів; зміну напрямку обертання; вплив режимів мікрокроку на характер руху. Такий порядок випробувань дозволив локалізувати помилки монтажу та уникнути одночасного впливу кількох невідомих факторів.

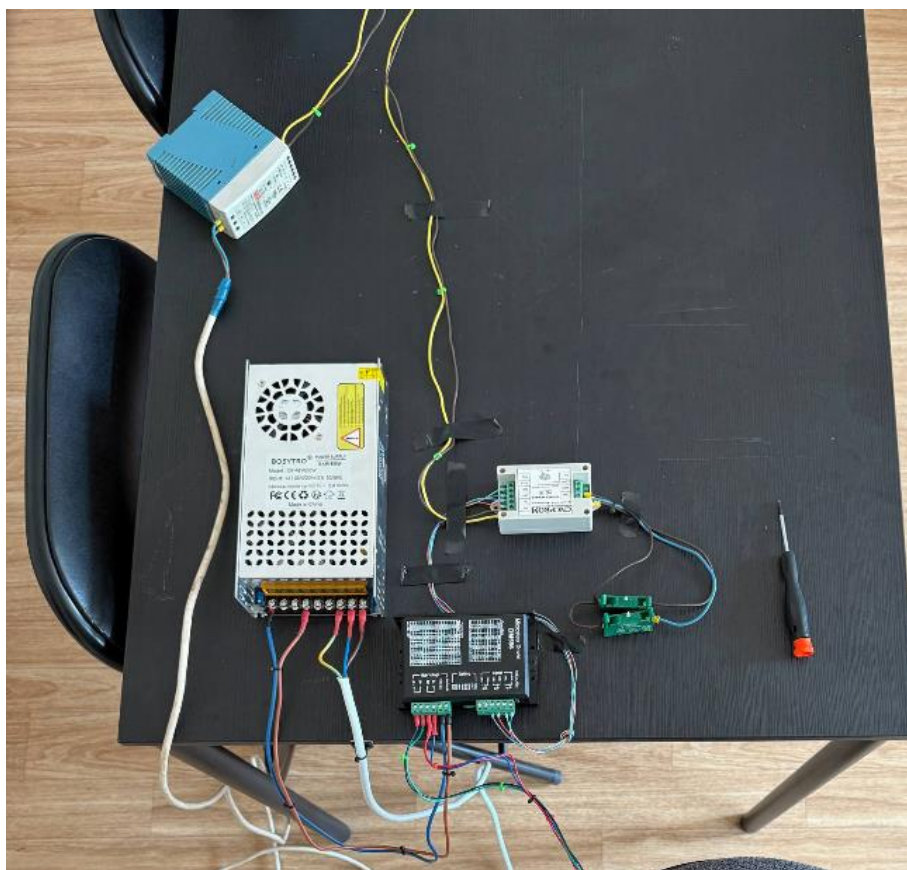


Рис. 3.4 - Експериментальний стенд

Практичним результатом є підтвердження того, що базова вісь із двигуном StepperOnline 1,9 Н·м і ремінною редукцією 1:4 забезпечує достатній запас для утримання зібраної руки у статичних положеннях. Це є критично важливим висновком для всієї конструкції, оскільки саме базова вісь визначає працездатність подальшого розгортання багатовісної системи.



Рис. 3. - Ремінна редукція

Окремо слід зазначити, що експериментальний стенд виявив і технологічні проблеми: вимоги до якісного обтиску наконечників, необхідність коректного мережевого кабелю з захисним проводом, чутливість друкованих посадок під вали та підшипники до фактичних налаштувань принтера, а також вплив якості пластику на геометрію та чистоту поверхні деталей. Усі ці результати є цінними для пояснювальної записки, оскільки демонструють реальний інженерний процес, а не лише теоретичну модель.

У межах підрозділу «3.7 Експериментальний стенд та результати випробувань» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій силову вісь було перевірено на окремому стенді з блоком

живлення, драйвером і генератором імпульсів. Для даного проєкту це має визначальне значення, оскільки поетапне тестування дозволило перевірити кожен рівень системи окремо. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Практичний аналіз конструкції свідчить, що режим утримання показав достатній запас моменту для навантаженого вузла. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціонування легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

Необхідно брати до уваги, що отримані результати створюють основу для інтеграції всіх осей у завершений маніпулятор. Для бакалаврського проєкту це означає необхідність працювати не лише з теоретичними параметрами, а й з реальними технологічними обмеженнями 3D-друку, точністю валів, посадками підшипників, якістю кабельного монтажу та можливостями зовнішніх драйверів. Саме тому в роботі прийнято підхід поетапного налагодження: спочатку формується конструктивна логіка вузла, далі перевіряється силова частина, і лише після цього виконується інтеграція в загальну систему керування.

Суттєвим є також положення про те, що поетапне тестування дозволило перевірити кожен рівень системи окремо. Порівняно з типовими промисловими рішеннями це може виглядати як спрощення, однак для бакалаврської роботи такий підхід є інженерно виправданим. Він дозволяє акцентувати увагу на тих рішеннях, які справді визначають ефективність маніпулятора: раціональному розподілі мас, наявності редукції на

навантажених осях, виборі режимів мікрокроку, безпечному мережевому підключенні й перспективі встановлення модульного кінцевого вузла.

Аналіз показує, що режим утримання показав достатній запас моменту для навантаженого вузла. При цьому завданням роботи не є копіювання промислового робота, а побудова доступної та експериментально перевіреної платформи. У такій системі допустима певна спрощеність окремих вузлів, якщо вона компенсується ясною логікою проектування, можливістю модернізації та чітким розумінням меж застосування. Саме цим пояснюється вибір комбінації друкованої механіки, стандартних компонентів і зовнішніх драйверів.

Отже, отримані результати створюють основу для інтеграції всіх осей у завершений маніпулятор, силову вісь було перевірено на окремому стенді з блоком живлення, драйвером і генератором імпульсів та поетапне тестування дозволило перевірити кожен рівень системи окремо разом формують основу для подальших рішень у межах даного розділу. Для проекту п'ятиосьового маніпулятора це означає можливість перейти від загальних міркувань до конкретних конструктивних та електронних рішень. Усі наведені положення надалі використовуються для обґрунтування вибору двигунів, ремінних передач, підшипникових вузлів, контролера Octopus та силових драйверів DM542/DM556.

Висновки до розділу 3

У межах підрозділу «Висновки до розділу 3» доцільно розглядати п'ятиосьовий роботизований маніпулятор з 3D-друкованими конструктивними елементами як цілісну мехатронну систему, в якій технічна реалізація ключових вузлів підтвердила правильність обраної архітектури. Для даного проекту це має визначальне значення, оскільки силова вісь успішно пройшла експериментальну перевірку. На практиці саме тут формується зв'язок між конструктивними рішеннями, вибором приводів, електронною архітектурою та подальшими алгоритмами керування. Аналіз показує, що без урахування вказаних факторів неможливо забезпечити ні

потрібну жорсткість, ні відтворюваність результатів під час складання та випробувань.

Для даної системи принципово, що маніпулятор має реальний потенціал до завершення і розвитку. У даному проєкті це реалізовано через використання друкованих несучих деталей, силових осей на NEMA 23, дистальних осей на NEMA 17 та модульного кінцевого інтерфейсу. Таке поєднання обрано не випадково: воно дозволяє одночасно зберегти доступність проєкту і забезпечити практичну придатність конструкції до позиціонування легкого функціонального модуля. Отже, підрозділ безпосередньо пов'язаний з підтвердженням працездатності всієї концепції.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Організаційно-правові основи забезпечення безпеки праці

Охорона праці у межах даного проекту розглядається як практичний інструмент запобігання травматизму, професійним ризикам і аварійним ситуаціям під час виготовлення, складання, налагодження та стендових випробувань п'ятиосьового роботизованого маніпулятора. Для цього об'єкта питання безпеки не можна зводити лише до формального дотримання інструкцій, оскільки в роботі поєднуються електромонтаж, механічне складання, 3D-друк, ручне налагодження приводів і тривала робота оператора за комп'ютером [23], [29].

В українській системі права базові вимоги щодо створення безпечних умов праці визначає Закон України «Про охорону праці», який встановлює обов'язок роботодавця або організатора робіт забезпечити безпечні умови, провести інструктаж, організувати контроль ризиків та не допускати до роботи за наявності явних небезпечних факторів [23]. Для ситуацій, пов'язаних із пожежами, аваріями, евакуацією та діями під час надзвичайних подій, застосовуються положення Кодексу цивільного захисту України [24].

Для технічного об'єкта, що містить мережеве живлення 230 В, блоки живлення постійного струму, драйвери крокових двигунів і рухомі вузли, важливими є також норми електробезпеки, пожежної безпеки та організації робочого місця. Саме тому при оцінюванні умов праці доцільно враховувати Правила улаштування електроустановок, вимоги до первинних засобів пожежогасіння, норми освітлення та мікроклімату виробничих приміщень [25]–[28]. У навчальній лабораторії ці норми реалізуються через справний мережевий ввід, використання захисного провідника РЕ, надійне кріплення кабелів, достатнє освітлення робочої поверхні та вільний доступ до відключення живлення.

Українська нормативна база у сфері безпеки праці узгоджується з міжнародним підходом, за яким головним завданням є не лише реагування на

наслідки, а насамперед попередження небезпечних подій. Такі принципи відображені у ДСТУ ISO 45001:2019, Директиві Ради 89/391/ЄЕС та Конвенції МОП № 187, де акцент зроблено на системному управлінні ризиками, профілактиці та відповідальності за безпечну організацію робіт [29]–[31]. Для бакалаврського проекту це означає, що розділ з охорони праці має ґрунтуватися на реальних ризиках експлуатації стенда, а не на абстрактному переліку небезпек.

Отже, організаційно-правові засади охорони праці для даного об'єкта полягають у поєднанні нормативних вимог із практичною інженерною дисципліною: перед початком робіт обладнання перевіряється, монтаж і зміна підключень виконуються лише при знеструмленні, небезпечні операції проводяться із застосуванням відповідних засобів захисту, а результати аналізу ризиків використовуються для вибору конкретних профілактичних заходів [23], [24], [29], [32].

4.2 Характеристика об'єкта та виявлення потенційних небезпек

Об'єктом аналізу у даному розділі є робоче місце оператора роботизованого маніпулятора в умовах навчальної лабораторії, де виконується складання, первинне налагодження і стендове випробування п'ятиосової системи. Робоче місце містить стіл або жорстку монтажну поверхню, персональний комп'ютер або ноутбук для налаштування, блоки живлення 48 В і допоміжні джерела живлення, драйвери DM542/DM556, плату керування, вимірювальні прилади, ручний інструмент, друковані деталі з PETG та металеві елементи конструкції. Роботи виконуються студентом або оператором, який безпосередньо контактує з електронними, механічними та програмними компонентами системи [29], [32].

Під час експлуатації і випробувань маніпулятора на робочому місці поєднуються декілька груп небезпек. До фізичних факторів належать ураження електричним струмом, травмування рухомими вузлами, контакт із

гострими кромками металевих деталей, підвищений шум та утворення металевого пилю при доведенні валів абразивним інструментом. До психофізіологічних факторів належить тривала робота за комп'ютером, монотонне налагодження та підвищена концентрація уваги під час випробувань. Окремо слід враховувати пожежну небезпеку через коротке замикання, перегрів елементів живлення або помилки в електромонтажі, а також загрози загального характеру, зокрема військову загрозу та необхідність реагування на сигнал повітряної тривоги [24], [26], [29].

Виявлення небезпек виконано відповідно до логіки, наведеної в методичних вказівках: для кожної небезпеки визначено її джерело та найбільш імовірні наслідки для працівника, обладнання і приміщення. Узагальнені результати подано в таблиці 4.1 [29].

Таблиця 4.1 – Виявлення потенційних небезпек стосовно об'єкта проектування

№	Потенційна небезпека	Джерело небезпеки	Можливі наслідки
1	Ураження електричним струмом	Мережеві клеми 230 В, блоки живлення, пошкоджена ізоляція, помилки підключення	Електротравма, опіки, вихід обладнання з ладу
2	Травмування рухомими частинами	Поворотні осі, ремінні передачі, вали, шківни, раптовий запуск двигуна	Удар, защемлення пальців, забій, пошкодження деталей
3	Порізи та мікротравми	Гострі країки металевих	Порізи кистей, інфікування,

		деталей, інструмент, задирки після обробки	втрата точності монтажу
4	Вплив пилу та аерозолів	Абразивна доробка сталевих валів, прибирання металевого пилу, продукти 3D- друку	Подразнення органів дихання й очей, забруднення обладнання
5	Пожежа або локальний перегрів	Коротке замикання, слабкий контакт у клеммах, перевантаження блоків живлення, перегрів драйверів	Займання ізоляції, пошкодження стенда, задимлення приміщення
6	Падіння стенда або вузлів	Недостатнє кріплення маніпулятора, нестійка поверхня, провисання кабелів	Механічне пошкодження обладнання, травмування оператора
7	Психофізіологічне перевантаження	Тривале налагодження, робота за комп'ютером,	Втома, помилки оператора, зниження якості

		висока концентрація уваги	прийнятих рішень
8	Військова загроза та повітряна тривога	Ракетна небезпека, необхідність термінової евакуації, раптове знеструмлення	Ризик для життя і здоров'я, пошкодження обладнання, аварійне завершення роботи

Аналіз таблиці 4.1 показує, що частина ризиків може бути істотно знижена організаційними заходами: інструктажем, заборонаю роботи під напругою, застосуванням окулярів і респіраторів під час абразивної обробки, фіксацією кабелів та регламентом аварійного відключення. Повністю усунути всі ризики неможливо, однак їх можна перевести до прийняттого або контрольованого рівня. Саме тому в наступному підрозділі виконано оцінювання кількох найбільш значущих небезпек за матричним методом [29], [32].

4.3 Дослідження ризику реалізації потенційних небезпек на об'єкті проєктування та розробка заходів щодо їх попередження

Оцінювання ризику є процедурою, за допомогою якої небезпеки не лише перелічуються, а й ранжуються за тяжкістю можливих наслідків і ймовірністю реалізації. Такий підхід дає змогу визначити, на які загрози слід реагувати першочергово, які заходи мають бути обов'язковими, а які – підтримувальними. Для цього у методичних вказівках запропоновано

використовувати матрицю оцінювання ризиків, у якій категорії серйозності позначаються від I до IV, а рівні ймовірності – від А до Е [29], [32].

У даній роботі для прикладу оцінено чотири небезпеки, що є найбільш характерними для лабораторної експлуатації стенда: ураження електричним струмом, травмування рухомими частинами, виникнення пожежі та шкідливий вплив пилу під час дробки металевих деталей. Результати оцінювання подано нижче у вигляді окремих матриць.

Таблиця 4.2 – Матриця оцінювання ризику ураження електричним струмом

Визначення категорії серйозності	Визначення рівня ймовірності	Індекс ризику небезпеки
II – критична: серйозна електротравма, опіки, ушкодження обладнання	D – віддалена ймовірність: подія малої ймовірності, але можлива при помилці монтажу або порушенні ізоляції	2D – небажаний (гранично допустимий) рівень ризику

Таблиця 4.3 – Матриця оцінювання ризику травмування рухомими частинами

Визначення категорії серйозності	Визначення рівня ймовірності	Індекс ризику небезпеки
III – гранична: забій, заземлення, короткочасна втрата працездатності	C – випадкова: подія може іноді виникати під час налагодження або ручного запуску осей	3C – небажаний (гранично допустимий) рівень ризику

Таблиця 4.4 – Матриця оцінювання ризику виникнення пожежі

Визначення категорії серйозності	Визначення рівня ймовірності	Індекс ризику небезпеки
I – катастрофічна: загроза життю, пошкодження стенда та приміщення	D – віддалена ймовірність: за нормальної експлуатації подія малої ймовірності, але можлива при короткому замиканні або перегріві	1D – небажаний (гранично допустимий) рівень ризику

Таблиця 4.5 – Матриця оцінювання ризику впливу металевого пилю та аерозолів

Визначення категорії серйозності	Визначення рівня ймовірності	Індекс ризику небезпеки
III – гранична: подразнення очей і дихальних шляхів, короткочасне погіршення самопочуття	C – випадкова: подія можлива щоразу при абразивній доробці валів без належного захисту	3C – небажаний (гранично допустимий) рівень ризику

Отримані індекси ризику свідчать, що основні небезпеки об'єкта не можна ігнорувати навіть у навчальній лабораторії. Для всіх розглянутих випадків потрібні перевірка технічного стану, чітка послідовність увімкнення та вимкнення стенда, використання засобів індивідуального захисту, а також підготовка оператора до дій у нештатних ситуаціях. Узагальнені профілактичні заходи наведено у таблиці 4.6 [23]–[29], [32].

Таблиця 4.6 – Заходи щодо зниження ризиків

№	Небезпека	Запропонований захід	Очікуваний результат
1	Ураження електричним струмом	Виконувати монтаж і зміну підключень лише при знеструмленні; застосовувати справний кабель з РЕ; закривати силові клеми; перед першим запуском перевіряти напругу мультиметром	Зниження ймовірності електротравми та пошкодження електроніки
2	Травмування рухомими частинами	Заборонити втручання в робочу зону при поданому живленні; фіксувати стенд; задавати обмеження швидкості; використовувати аварійне вимкнення	Зменшення ризику удару або заземлення під час випробувань

3	Порізи та мікротравми	Знімати задирки, використовувати рукавички під час механічного складання, зберігати інструмент у визначених місцях	Зниження кількості дрібних травм і підвищення безпеки монтажу
4	Вплив пилу та аерозолів	Проводити абразивну доробку лише в окулярах і респіраторі; після робіт прибирати пил; не виконувати обробку металу біля електроніки	Зменшення шкідливого впливу на органи дихання та очі, підвищення чистоти робочої зони
5	Пожежа або локальний перегрів	Контролювати затягування клем, не перевищувати допустимі струми драйверів, забезпечити вентиляцію, мати вогнегасник у лабораторії	Зниження ймовірності займання та швидка локалізація інциденту

6	Падіння стенда або вузлів	Розміщувати стенд на жорсткій поверхні, не допускати звисання важких кабелів, перевіряти кріплення перед запуском	Підвищення стійкості конструкції та збереження обладнання
7	Психофізіологічне перевантаження	Регламентувати тривалість безперервної роботи, робити перерви, розділяти етапи монтажу і налагодження	Зменшення втоми оператора та кількості помилок
8	Військова загроза та повітряна тривога	При сигналі тривоги негайно знеструмлювати стенд, припиняти роботи та прямувати до укриття згідно з планом евакуації	Зниження ризику для життя та впорядковане завершення робіт в екстремній ситуації

Запропоновані заходи не потребують складної або дорогої інфраструктури, тому є реалістичними для навчальної лабораторії й безпосередньо придатними до практичного впровадження. Їх виконання дає

зможу перевести більшість ризиків з небажаного рівня до контрольованого або прийняттого за умови регулярного нагляду і дисциплінованої експлуатації стенда [23], [24], [26], [29], [32].

Висновки до розділу 4

У розділі виконано аналіз питань охорони праці стосовно експлуатації п'ятиосьового роботизованого маніпулятора в умовах навчальної лабораторії. Розглянуто організаційно-правові основи забезпечення безпечної праці, коротко охарактеризовано законодавчу та нормативну базу України, а також показано її зв'язок із сучасним ризик-орієнтованим підходом до безпеки [23], [24], [29]–[32].

У ході аналізу об'єкта визначено основні потенційні небезпеки: ураження електричним струмом, травмування рухомими частинами, порізи під час механічного складання, вплив пилу та аерозолів, пожежну небезпеку, падіння стенда, психофізіологічне перевантаження та військову загрозу. Для найбільш значущих небезпек проведено матричне оцінювання ризику та встановлено, що вони належать переважно до небажаного, але керованого рівня за умови вжиття профілактичних заходів [29], [32].

За результатами роботи рекомендовано технічні та організаційні заходи, які доцільно застосовувати на досліджуваному об'єкті: знеструмлення перед монтажем, перевірка правильності підключення L/N/PE, контроль клемних з'єднань, фіксація стенда, використання окулярів і респіратора при абразивній обробці, наявність вогнегасника, а також регламент дій під час повітряної тривоги. Отже, розділ підтверджує, що безпечна експлуатація маніпулятора визначається не лише конструкцією, а й організацією робіт, дисципліною оператора та системним управлінням ризиками.

ВИСНОВКИ

Суттєвим результатом роботи є не лише побудова теоретичної моделі, а й поетапне доведення працездатності ключових вузлів на реальному стенді. Саме це дозволяє вважати проєкт практично значущим і придатним для подальшого розвитку в межах наступних етапів навчання або науково-дослідної роботи.

У результаті виконання випускної кваліфікаційної роботи було сформовано цілісну концепцію п'ятиосового роботизованого маніпулятора з друкованими конструктивними елементами на основі крокових двигунів. Проведено аналіз предметної області, розглянуто сучасні аналоги, визначено ключові переваги та обмеження доступної робототехнічної платформи, орієнтованої на точне позиціонування легкого функціонального модуля. Показано, що поєднання 3D-друкованої механіки, стандартних валів і підшипників, ремінної редукції та зовнішніх драйверів крокових двигунів є технічно виправданим підходом для побудови експериментального багатовісного маніпулятора.

У процесі аналітичного обґрунтування встановлено, що найбільш навантажені осі потребують окремого підходу до вибору приводів. Використання двигуна NEMA 23 з утримувальним моментом 1,9 Н·м у поєднанні з ремінною редукцією 1:4 дозволяє отримати момент на осі, достатній для утримання плеча маніпулятора з реальним навантаженням порядку 1,0–1,2 кг. Водночас двигуни NEMA 17 є доцільними для менш навантажених дистальних осей, оскільки дозволяють зменшити масу кінцевої частини та покращити загальний баланс конструкції.

Описано й обґрунтовано електронну архітектуру системи, що включає плату BIGTREETECH Octopus V1.1, зовнішні драйвери DM542 та DM556, а також розділену систему живлення силового і логічного контурів. Показано, що така архітектура забезпечує гнучкість, масштабованість і можливість подальшого розвитку проєкту без переходу на дорогі промислові контролери.

Важливою складовою стали питання правильного силового монтажу, вибору кабелів, клем і поетапного запуску системи.

Експериментальні випробування силової осі підтвердили працездатність ключового вузла маніпулятора. Отримано позитивний результат у вигляді стабільного режиму утримання та керованого обертання навантаженої осі за допомогою генератора імпульсів і драйвера DM556. Це дозволяє зробити висновок про правильність основних технічних рішень і про придатність обраної силової схеми до подальшої інтеграції всіх п'яти осей у єдину систему.

У роботі також показано, що кінцевий вузол маніпулятора доцільно розглядати як універсальний модульний інтерфейс, придатний до встановлення інспекційної, сенсорної або легкої інструментальної головки. Такий підхід є більш раціональним для навчального і дослідницького проекту, ніж спроба одразу реалізувати складний силовий захват. Він зберігає інженерну цінність системи та відкриває перспективу подальшого розвитку у магістерському проекті.

Отже, мету роботи досягнуто: розроблено та обґрунтовано проект п'ятиосового роботизованого маніпулятора з друктованими конструктивними елементами, вибрано та частково випробувано його електромеханічну основу, а також сформовано технічну, експлуатаційну й безпекову базу для завершення повнофункціональної системи. Подальший розвиток проекту доцільно спрямувати на повне збирання всіх осей, інтеграцію кінцевих вимикачів, реалізацію алгоритмів домашнього позиціонування, підключення функціонального модуля та створення розширеного програмного забезпечення керування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Craig J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 4th ed. Pearson. 2018. 438 p.
2. Siciliano B., Khatib O. Springer Handbook of Robotics. Springer. 2016. 1611 p
3. Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control. Wiley. 2020. 608 p
4. Niku S. B. Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications. Wiley. 2020. 528 p.
5. Болтянський Г. В. Автоматизація та робототехніка у машинобудуванні. Київ: Наукова думка.
6. Ковальчук П. І. Основи проєктування мехатронних систем. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.
7. Каталог Stepperonline. NEMA 23 Stepper Motors. URL: <https://www.omc-stepperonline.com/download/23HS22-2804S.pdf>
8. Технічний опис драйвера DM556. Керівництво користувача. URL: <https://www.leadshine.com/legacys/DM556.html>
9. Технічний опис драйвера DM542. Керівництво користувача. URL: https://www.omc-stepperonline.com/download/DM542_User_Manual.pdf
10. BIGTREETECH Octopus V1.1. Hardware Reference and User Guide. URL: <https://github.com/bigtreetech/BIGTREETECH-OCTOPUS-V1.0>
11. Gates. Design Manual for Timing Belts and Pulleys. URL: <https://www.gates.com/content/dam/documents-library/catalogs/powergrip-gt3-drive-design-manual-en.pdf>
12. SKF Rolling Bearings Catalogue. URL: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196802809de-Rolling-bearings--17000_1-EN_tcm_12-121486.pdf
13. Horvath J. Mastering 3D Printing. Apress. 2014. 224 p.
14. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. Springer. 2021. 675 p.

15. Bambu Lab A1 mini. User Manual and Material Guidelines. URL: <https://wiki.bambulab.com/en/a1-mini/manual>
16. Правила улаштування електроустановок.
17. Нормативні документи з охорони праці в навчальних лабораторіях.
18. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційних робіт кафедри АКІТ.
19. Документація до ремінних передач GT2 та сумісних шківів.
20. Документація виробників PETG та PETG-CF для FDM-друку.
21. ДСТУ та ГОСТ щодо захисного заземлення і кабельних з'єднань.
22. Матеріали відкритих інженерних проєктів малогабаритних маніпуляторів.
23. Закон України «Про охорону праці». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12>
24. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/5403-17>
25. Правила улаштування електроустановок.
26. Правила пожежної безпеки в Україні, затверджені наказом МВС України від 30.12.2014 № 1417. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0252-15>
27. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення.
28. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/va042282-99>
29. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування.

30. Директива Ради 89/391/ЄЕС про запровадження заходів, що сприяють поліпшенню безпеки й гігієни праці працівників.

31. Конвенція МОП № 187 Про основи, що сприяють безпеці й гігієні праці. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/993_515#Text

32. Малишева В. В. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» в дипломних роботах бакалаврів. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025.

ДОДАТОК А

У додатку А доцільно звести перелік основних технічних характеристик застосованих компонентів та параметри їх налаштування. Така інформація є корисною для відтворення стенда, перевірки сумісності елементів і подальшої модернізації.

Базова вісь: кроковий двигун StepperOnline NEMA 23, 1,9 Н·м holding torque, номінальний струм 2,8 А, ремінна передача 20Т/80Т, орієнтовне передаточне число 1:4, драйвер DM556, джерело живлення 48 В.

Допоміжні осі: крокові двигуни NEMA 17 стандартного та зменшеного виконання, драйвери DM542 або сумісні, джерело живлення 24 В або 48 В залежно від конкретного вузла та схеми інтеграції.

Несучі вузли: друковані деталі з PETG/PETG-CF, сталеві вали діаметром 10 мм, підшипники 10x28 мм, різьбові кріпильні елементи, ремені та шківни стандартного профілю.

Керування та налагодження: генератор імпульсів PG-IE для тестового запуску, мультиметр для перевірки напруги та пар обмоток, плата BIGTREETECH Octopus V1.1 як перспективна платформа для багатовісної інтеграції.

Додаток А містить зведені технічні характеристики основних компонентів маніпулятора. До силових приводів віднесено два крокові двигуни типорозміру NEMA 23, один з яких має утримувальний момент 1,9 Н·м і використовується на осі плеча у поєднанні з ремінною редукцією 1:4. Дистальні осі зап'ястя комплектуються двигунами NEMA 17, у тому числі тонкими рапсаке-модифікаціями для зменшення маси кінцевої частини.

До складу електронної частини входять драйвери DM556 для силових осей, драйвери DM542 для менш навантажених осей, плата керування BIGTREETECH Octopus V1.1, блок живлення 48 В для драйверів та окремий блок живлення нижчої напруги для логічної частини. Механічна частина використовує друковані деталі з PETG або PETG-CF, сталеві вали діаметром

10 мм, підшипники 10x28 мм, ремені та шківи з передаточними числами, визначеними для конкретних осей.

При проектуванні друкованих деталей доцільно використовувати стінки порядку 10–15 мм у навантажених зонах, не менше п'яти периметрів та заповнення близько 40 % типу gyroid. Для великих несучих деталей рекомендовано орієнтувати модель так, щоб напрямок основного навантаження проходив уздовж найбільш міцних контурів деталі, а не розривався по шарах.

ДОДАТОК Б

У додатку Б наведено рекомендовану послідовність стендового пуску і первинного налагодження. Така послідовність зменшує ризик пошкодження обладнання та спрощує локалізацію помилок.

1. Перевірити мережевий кабель, наявність захисного провідника РЕ та правильність підключення L/N/PE до блока живлення.

2. Подати мережеве живлення лише на блок живлення без підключення драйверів і перевірити вихідну напругу мультиметром.

3. Підключити драйвер до джерела живлення, перевірити індикацію та відсутність аномального нагріву.

4. Визначити пари обмоток крокового двигуна мультиметром у режимі вимірювання опору, після чого підключити двигун до драйвера лише при знеструмленому стенді.

5. Подати сигнали STEP/DIR з генератора імпульсів, перевірити утримання, напрям обертання та плавність зміни частоти.

6. За потреби змінити режим мікрокроку та струм драйвера, орієнтуючись на нагрів двигуна, плавність руху і запас по моменту.

7. Лише після повної перевірки окремої осі переходити до інтеграції кількох приводів у єдину систему керування.

Додаток Б присвячений рекомендаціям з первинного запуску, монтажу та налагодження осей маніпулятора. Перед подачею живлення необхідно окремо перевірити блок живлення мультиметром у режимі вимірювання постійної напруги на виході V+ та V-. Після цього драйвер підключається до джерела живлення без двигуна, перевіряється індикація і відсутність аварійного режиму, і лише далі до нього приєднується кроковий двигун.

Пари обмоток крокового двигуна визначаються мультиметром у режимі вимірювання малого опору. Дві жили, між якими спостерігається малий опір, утворюють одну фазу. Їх слід підключати до клем A+ і A- або B+ і B-. Після подачі живлення на драйвер перевіряється режим утримання: вал не повинен легко прокручуватися рукою. Наступним етапом подаються сигнали PUL і

DIR від генератора імпульсів або контролера. Якщо двигун лише тремтить або ривками рухається, слід повторно перевірити правильність визначення пар обмоток.

Під час монтажу мережевої частини обов'язковими є правильне підключення фазного провідника до L, нульового до N та захисного заземлення до PE або FG. Усі силові проводи повинні мати надійно обтиснуті наконечники, а кабелі – механічне розвантаження. Забороняється переставляти дроти двигуна на ввімкненому драйвері, а також торкатися відкритих силових клем блока живлення під напругою.