

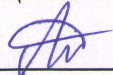
Вінницький національний технічний університет  
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем  
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

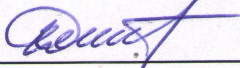
на тему:

Дослідження та розробка 3Д моделі та системи керування роботизованою  
рукою

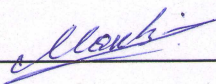
Виконав: студент 2-го курсу, гр. БМІ-22м  
спеціальності 163 Біомедична інженерія

 Левандовський К.О.

Керівник: к. т. н., доц. каф. БМІОЕС


 Штофель Д.Х.

Опонент: ст.викл. каф. ІКСТ

 Макогон В.І.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри БМІОЕС

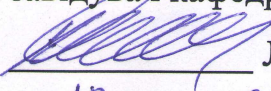
 к. т. н., доц. Коваль Л. Г.

«01» 12 2023 р.

Вінницький національний технічний університет  
Факультет інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем  
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Галузь знань 16 Хімічна та біоінженерія  
Спеціальність 163 Біомедична інженерія  
Освітньо-професійна програма «Інтелектуальні штучні імпланти та медичні апарати в біоінженерії»

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри БМІОЕС

 Л. Г. Коваль  
« 18 » 09 2023 р.

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Левандовському Костянтину Олександровичу

1. Тема роботи: Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованою рукою

Керівник роботи: Штофель Д.Х., канд. техн. наук, доцент  
затверджені наказом ВНТУ від «18» вересня 2023 року № 247.

2. Строк подання студентом роботи «01» грудня 2023 року.

3. Вихідні дані до роботи:

3.1. електроміограми (ЕМГ) руху верхніх кінцівок, отримані під час різних рухів та активностей,

3.2. метод цифрового розпізнавання біоелектричних образів для аналізу та інтерпретації ЕМГ,

3.3. метод схемотехнічного проектування для розробки системи керування роботизованою рукою,

3.4. максимальна напруга: 5.5 В. Струм: 1 мА.

3.5 використання програм для створення 3D моделі, таких як SolidWorks, Blender.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1. Аналіз методів та засобів конструювання протезів руки.

4.2. Дослідження електричної активності м'язів верхньої кінцівки.

4.3. Розробка структурної схеми та інформаційного синтезу системи керування протезом руки.

4.4. Розрахунок ключових елементів системи управління протезом руки:

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

5.1. Аналіз та висновки, отримані в результаті проведених експериментів.

5.2. Графічне представлення архітектури та взаємозв'язків компонентів системи керування протезом.

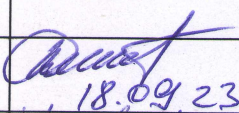
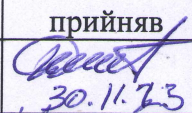
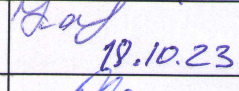
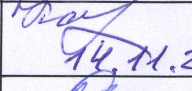
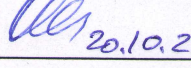
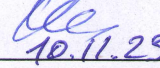
5.3. Графічне зображення структури та зв'язків елементів електричної принципової схеми підсилювача біопотенціалів.

5.4. Графічне відображення основних етапів та логіки роботи програмного забезпечення мікроконтролера.

4. Зміст текстової частини:

- огляд наукових джерел;
- оцінка та вибір електричного та електронного устаткування;
- Визначення конструкції антропоморфної робототехнічної руки;
- система керування безколекторним двигуном постійного струму;
- моделювання електродвигуна постійного струму безколекторного типу;
- симуляція системи позиційного електроприводу з використанням безколекторного двигуна постійного струму;
- реалізація робочої установки та її компонентів у практиці;
- економічна частина;
- охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

6. Консультанти розділів роботи

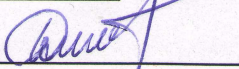
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Штофель Д.Х. к. т. н., доц. каф. БМІОЕС	 18.09.23	 30.11.23
Економічна частина	Кавецький В. В. доцент. каф. ЕП та ВМ	 18.10.23	 14.11.23
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Дембіцька С.В. к. п. н., проф. каф. БЖДПБ	 20.10.23	 10.11.23

7. Дата видачі завдання «18» вересня 2023 року.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Ірим.
Розробка технічного завдання	до 15.10.2023	
Техніко-економічний аналіз завдання, економічного середовища, обґрунтування вихідних даних та оптимального варіанту розробки	20.10.2023	
Розв'язання основної задачі	10.11.2023	
Розробка заходів з охорони праці	15.11.2023	
Розрахунок техніко-економічних показників	20.11.2023	
Оформлення графічної частини та пояснювальної записки	30.11.2023	
Попередній захист	01.12.2023	

Студент  Левандовський К.О.

Керівник роботи  Штофель Д.Х.

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- 3D - Тривимірний
- CAD - Комп'ютерне проектування (Computer-Aided Design)
- CAM - Комп'ютерне виробництво (Computer-Aided Manufacturing)
- DOF - Ступені свободи (Degrees of Freedom)
- CAD/CAM - Інтеграція комп'ютерного проектування та виробництва
- IoT - Інтернет речей (Internet of Things)
- AI - Штучний інтелект (Artificial Intelligence)
- VR - Віртуальна реальність (Virtual Reality)
- AR - Доповнена реальність (Augmented Reality)
- ROS - Робототехнічна операційна система (Robot Operating System)
- PID - Пропорційно-інтегрально-диференціальний (Proportional-Integral-Derivative)
- PLC - Програмований контролер логіки (Programmable Logic Controller)
- HMI - Інтерфейс людина-машина (Human-Machine Interface)
- TCP - Точка керування (Tool Center Point)
- IK - Кінематика (Inverse Kinematics)
- FK - Пряма кінематика (Forward Kinematics)
- CAD Model - Модель комп'ютерного проектування
- GUI - Графічний інтерфейс користувача (Graphical User Interface)
- SOP - Система орієнтації та позиціонування (System of Orientation and Positioning)
- EMG - Електроміографія (Electromyography)

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.374

Левандовський К.О. Дослідження та розробка 3Д моделі та системи керування роботизованою рукою: магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 163 Біомедична інженерія, освітньо-професійна програма «Інтелектуальні штучні імпланти та медичні апарати в біоінженерії». Вінниця : ВНТУ, 2023. 117 с.

Укр. мовою. Бібліогр.: 36 найм.; 64 рис.; 20 табл.

У магістерській кваліфікаційній роботі була розглянуто електромеханічна система для антропоморфної робототехнічної руки, заснованої на безколекторному двигуні постійного струму. У роботі був проведений аналітичний огляд сучасних робототехнічних рук, розглянуті методи передачі руху та формування завдань для виконавчого механізму. Було обрано відповідне електричне та електронне обладнання, а також розроблено конструкцію для реалізації антропоморфної робототехнічної руки. Проведено моделювання та збірку готової моделі руки. Розроблена рукавичка для керування виготовленою моделлю, що базується на датчиках вигину. Здійснено математичний опис безколекторного двигуна постійного струму у природній трифазній системі координат та у координатах  $dq$ . Розроблено програму для вивчення характеристик системи керування безколекторним двигуном постійного струму та керування антропоморфною робототехнічною рукою.

## ABSTRACT

Levandovsky K.O. Research and development of a 3D model and a control system of a robotic arm: master's qualification thesis on the specialty 163 Biomedical Engineering, educational and professional program "Intelligent artificial implants and medical devices in bioengineering". Vinnytsia: VNTU, 2023. 117 p.

Ukraine language Bibliography: 36 names; 64 Fig.; 20 tables

In the master's qualification work, an electromechanical system for an anthropomorphic robotic arm based on a brushless direct current motor was considered. In the work, an analytical review of modern robotic hands was carried out, the methods of movement transmission and the formation of tasks for the executive mechanism were considered. Appropriate electrical and electronic equipment was selected, and a design was developed for the implementation of an anthropomorphic robotic arm. The finished model of the hand was modeled and assembled. A glove has been developed to control a manufactured model based on bending sensors. A mathematical description of the brushless direct current motor in the natural three-phase coordinate system and dq coordinates is carried out. A program has been developed to study the characteristics of a brushless DC motor control system and control an anthropomorphic robotic arm.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	2
ВСТУП.....	4
1 ОГЛЯД НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ.....	6
1.1 Аналіз функціональних можливостей роботизованих верхніх кінцівок відомих виробників .....	6
1.1.1 Протез від компанії «Ottobock» .....	6
1.1.2 Протез від компанії Össur .....	8
1.1.3 Протез від компанії BrainRobotics .....	8
1.1.4 Протез від компанії Youbionic .....	10
1.1.5 Протез від компанії Shadow Robot .....	11
1.1.6 Протез від компанії Esper Bionics.....	12
1.2 Огляд механічних та електричних аспектів конструкцій робототехнічної руки	14
1.2.1 Механізми передачі руху .....	14
1.2.2 Аналіз використовуваних в роборуках датчиків для збору інформації .....	17
2 ОЦІНКА ТА ВИБІР ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОННОГО УСТАТКУВАННЯ.....	25
2.1 Вибір двигуна .....	25
2.2 Датчик стискання .....	27
2.3 Плата керування .....	29
2.4 Оцінка та вибір електричного та електронного устаткування.....	31
3 ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ АНТРОПОМОРФНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ РУКИ.....	34
3.1 Дизайн робототехнічної руки.....	34
3.2 Створення електромеханічного макету руки .....	36
3.2.1 Конструкція .....	37
3.2.2 Каркас .....	39
4. СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БЕЗКОЛЕКТОРНИМ ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	46
4.1 Функціональна діаграма управлінської системи .....	46
4.2 Втілення апаратної складової електроприводу .....	48

5	МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ БЕЗКОЛЕКТОРНОГО ТИПУ .....	53
5.1	Математичний опис у природній трифазній системі координат .....	56
5.2	Математична формулювання моделі двигуна в координатах dq.....	59
6	СИМУЛЯЦІЯ СИСТЕМИ ПОЗИЦІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗКОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	60
6.1	Розробка моделі електроприводу з системою позиційного управління за використання безколекторного постійного струму .....	60
6.2	Дослідження системи позиційного керування електроприводу, заснованого на безколекторному постійному струмі, з використанням математичного моделювання .....	65
7	РЕАЛІЗАЦІЯ РОБОЧОЇ УСТАНОВКИ ТА ЇЇ КОМПОНЕНТІВ У ПРАКТИЦІ.	72
7.1	Установка робочого обладнання .....	72
7.2	Кінематична структура модульного протезу кисті .....	74
7.3	Характеристика вимірювальних засобів .....	75
7.4	Електрична схема .....	78
7.5	Програма.....	79
8	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	82
8.1	Оцінювання наукового ефекту .....	82
8.2	Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи.....	86
8.2.1	Витрати на оплату праці .....	87
8.2.2	Відрахування на соціальні заходи.....	54
8.2.3	Сировина та матеріали .....	90
8.2.4	Розрахунок витрат на комплектуючі .....	92
8.2.5	Спецстаткування для наукових (експериментальних) робіт .....	92
8.2.6	Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт .....	93
8.2.7	Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень .....	94
8.2.8	Паливо та енергія для науково-виробничих цілей.....	95
8.2.9	Службові відрядження .....	97



8.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації .....	97
8.2.11 Інші витрати .....	98
8.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати .....	98
8.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	99
9 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	102
9.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи .....	103
9.1.1. Обладнання приміщення та робочого місця .....	103
9.1.2. Електробезпека приміщення.....	105
9.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії .....	106
9.2.1. Мікроклімат .....	106
9.2.2. Склад повітря робочої зони .....	107
9.2.3. Виробниче освітлення .....	108
9.2.4. Виробничий шум .....	109
9.2.5. Виробничі випромінювання .....	110
9.2.6 Психофізіологічні фактори .....	112
9.3. Безпека в надзвичайних ситуаціях .....	113
9.3.1. Особливості впливу іонізуючого випромінювання на людину .....	113
9.3.2. Розрахунок коефіцієнта протирадіаційного захисту підвального приміщення	114
ВИСНОВКИ .....	120
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	1222

## ВСТУП

**Актуальність.** У світі існує кілька причин, які призводять до тривожних статистичних показників з ампутацією кінцівок, таких як військові конфлікти, нещасні випадки, різні захворювання та відсутність ефективної громадської охорони здоров'я. За відомостями, близько 15% всіх людей у світі мають анатомічні дефекти, і кожен рік понад 50 мільйонів осіб стають інвалідами. Під час воєн ці показники збільшуються кількаразово. Зокрема, серед тих, хто має ампутаційні дефекти, 8% втрачають верхні кінцівки, включаючи 42% втрати пальців та кісток рук. Втрата кінцівок не лише призводить до втрати самостійності та працездатності, але й часто супроводжується глибокою психологічною травмою, зниженням гідності та соціальним становищем людини. Таким чином, протезування стає одним з ключових етапів у відновленні пацієнтів після ампутації.

На сучасному етапі науково-технічний прогрес сприяє розробці електромеханічних протезів, які не лише функціонально, але й зовнішньо схожі на природні кінцівки. Протягом останніх десятиліть вчені, інженери та програмісти в різних країнах активно працюють над вирішенням цієї проблеми. З використанням передових технологій, інноваційних матеріалів, розумного розташування електроприводів, сенсорів дотику та літій-іонних акумуляторів вдалося створити біонічні верхні кінцівки, які можуть ефективно виконувати більшість щоденних завдань.

Однак головною проблемою у цій сфері залишається висока вартість готових протезів. Таким чином, розробка якісних та доступних антропоморфних робототехнічних рук залишається актуальною та важливою завданням, яке потребує вчасного вирішення.

**Об'єкт розробки** – роботизована рука.

**Предмет розробки** – 3D модель та системи керування для роботизованої руки.

**Мета роботи магістерської кваліфікаційної** – покращення функціональності та ефективності роботизованої руки шляхом створення та

оптимізації 3D моделі та системи керування, що дозволить забезпечити точність, швидкість та надійність її роботи в різних умовах використання.

**Методи** базуються на концепціях автоматизованого керування та електроприводу, які допомагають в розробці та оптимізації систем для ефективного управління та забезпечення необхідного рівня функціональності. У ході дослідження були враховані принципи теорії автоматичного керування та основи теорії електроприводу. Результати роботи базуються на концепціях автоматизованого керування та електроприводу, які допомагають в розробці та оптимізації систем для ефективного управління та забезпечення необхідного рівня функціональності.

**Новизна магістерської кваліфікаційної роботи** полягає в удосконаленні системи керування положенням пальців робототехнічної руки була вдосконалена за допомогою безколекторних двигунів постійного струму.

**Актуальність магістерської кваліфікаційної роботи** – покращення функціональності протезу руки.

## 1 ОГЛЯД НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Аналіз функціональних можливостей роботизованих верхніх кінцівок відомих виробників.

У всьому світі існує множина фірм та підприємств, які спеціалізуються на виробництві протезів для верхніх кінцівок. Ці протези варіюються за кінематичними схемами, використаними матеріалами, складом електричного та електронного обладнання, функціональними можливостями та вартістю. У галузі робототехніки фахівці забезпечили повний зв'язок між протезами та нервовою системою їхніх користувачів.

Коли особа без руки має намір рухнути пальцем, мозок генерує відповідний сигнал, який передається нервами до м'язів кінцівки. Вбудовані в протез датчики перехоплюють цей імпульс і передають його для подальшої обробки. Після аналізу та обробки даних формується команда управління роботизованою рукою.

Серед різновидів функціональних протезів найпоширені механічні та біонічні. Одні пристрої можуть мати косметичну оболонку, що імітує зовнішній вигляд руки, а інші відрізняються високотехнологічним дизайном. Далі розглянемо кілька конкретних приклад

### 1.1.1 Протез від компанії «Ottobock»

Модель Bebionic Hand EQD (див. рис. 1.1), розроблена компанією «Ottobock», представляє собою багатошаровий протез руки з міоелектричним управлінням, доступний на ринку. Цей продукт володіє багатою функціональністю шарнірного протеза руки та призначений для використання в різних ситуаціях, таких як захоплення, тискання, тягання та переміщення предметів.

Дизайн виробу ретельно розроблений таким чином, щоб він максимально відповідав анатомії та вазі людської руки. Великий палець, що може рухатися у двох напрямках (протилежний та бічний), дозволяє використовувати до 14

різновидів хвату. Технік-ортопед може налаштовувати 8 різновидів хвату за допомогою вбудованого програмного забезпечення. Ланцюг для натягу пальців, що служить захистом від перевантаження, забезпечує захист 4 активно приведених в рух пальців. У випадку перевантаження відповідний палець перестає гнутися, оскільки з'єднання з приводом автоматично розірвано. Ланцюг для пальців може бути замінений авторизованим протезистом. Вартість протезів Bebionic Hand починається від 20,000 доларів [1].



Рисунок 1.1 – Модель руки Bebionic Hand EQD

### 1.1.2 Протез від компанії Össur

Компанія Össur є світовим лідером у сфері створення неінвазивних ортопедичних виробів та надання відповідних послуг. Серія протезів для рук під назвою i-Limb, розроблена цією компанією, включає в себе індивідуально моторизовані пальці, систему виявлення зупинок та унікальний мобільний додаток для управління, призначений для пристроїв Apple iOS. Інформація про виріб розташована на верхній частині пристрою. Протез складається як частина індивідуально адаптованого гнізда, створеного спеціально для конкретного користувача.

Користувачі можуть обирати з набору автоматизованих захватів та жестів, які полегшують виконання їх повсякденних завдань. Залежно від моделі рукоятки

можуть бути налаштовані та автоматизовані додаткові функції для забезпечення додаткового контролю. Хоча окремі пальці не керуються незалежно, автоматизовані захвати дозволяють користувачеві i-Limb переміщувати певні пальці для захоплення об'єкта або виконання жесту.

Для повноцінного використання руки i-Limb та максимального використання всіх її функціональних переваг потрібен певний період навчання. Вартість біонічного протезу руки починається приблизно від 19,000 євро [2].



Рисунок 1.2 – Модель руки компанії Össur

### 1.1.3 Протез від компанії BrainRobotics

Створення протезу руки від BrainRobotics виникло з усвідомлення того, що звичайні металеві гачки або статичні протези обмежують своєю функціональністю, а роботизовані протези для одного використовують фізичні кнопки або рухи протеза, надаючи лише обмежений перелік жестів. Біонічна рука з можливостями штучного інтелекту не тільки забезпечує точний контроль за кожним пальцем, щоб вони виконували різноманітні жести та захоплення, але й вивчає нові рухи в процесі експлуатації. При цьому вартість біонічної руки BrainRobotics складає 30% менше, ніж функціональні протези, які представлені на ринку.

Протез BrainRobotics виготовлений з високоякісних матеріалів, таких як алюміній та авіаційний пластик. Розроблений алгоритм BrainRobotics відстежує найменші м'язові сигнали, перетворюючи їх у рухи руки та поступово вивчається з часом. Протез реагує на кожен з м'язових тригерів, записаних під час вихідної вправи, дозволяючи власнику біонічної руки інтуїтивно виконувати задумані рухи та жести, які з практикою стають все більш реалістичними. Вартість протезів для рук починається від 17,000 доларів [3].



Рисунок 1.3 – Протез руки BrainRobotics

#### 1.1.4 Протез від компанії Youbionic

Ще одну інноваційну модель роботизованої руки пропонує компанія Youbionic. Цей протез відрізняється високотехнологічним змістом та безліччю можливостей у сфері руху. Виготовлений за допомогою 3D-принтера, цей протез призначений для виконання всіх можливих рухів, які може виконати людська рука. Він може функціонувати як маніпулятор або служити протезом.

У випадку використання як маніпулятор, управління реалізується дистанційно в реальному часі, з можливістю часткової автоматизації завдяки програмуванню складних рухів. Ця новаторська рука вирізняється застосуванням передової системи руху, яка забезпечує доступ до кожної точки простору за допомогою кінчиків пальців. Зауважте, що вона позбавлена металевих елементів чи шестерень, але складається виключно з компонентів, виготовлених за допомогою 3D-друку та кріпильних гвинтів. Такий протез здатний виконувати рухи, недосяжні для інших роботизованих систем. Кожен суглоб забезпечує обертання відповідного пальця, що дозволяє здійснювати будь-яке захоплення та позиціонування. Завдяки використанню пластикових матеріалів, створених за допомогою 3D-друку, протез має надзвичайну компактність та гнучкі форми, доступні у різних кольорах. Ціна на цей протез становить 1,499 євро [4].



Рисунок 1.4 – Роботизована рука «Youbionic»

#### 1.1.5 Протез від компанії Shadow Robot

Наступний інноваційний продукт на ринку представлений компанією Shadow Robot. Shadow Dexterous Hand (див. рис. 1.5) є вдосконаленою системою руки робота-гуманоїда, що забезпечує 24 рухи для максимально точного відтворення кінематики та спритності людської руки. Цей протез був розроблений з метою надання великої сили та точності рухів, аналогічних людським.



Shadow Hand використовується в дослідженнях з області захоплення об'єктів, маніпулювання, нейронного керування, інтерфейсу мозок-комп'ютер, промислового контролю якості та роботи з небезпечними матеріалами. Система управління дозволяє автоматично захоплювати предмети різної форми. Однак, у зв'язку з великою масою та розмірами передпліччя, де розміщуються сервоприводи, такі рішення важко використовувати в якості біонічних протезів. Тому, на відміну від антропоморфних маніпуляторів, для роботи в біонічних протезах використовується обмежений набір приводів та спеціальна конструкція пальця, де дистальна фаланга з'єднана з медіальною для зменшення кількості рухомих елементів. Це необхідно для зменшення ваги протеза та розміщення електроніки та моторів всередині кисті, оскільки автономний пензель дозволяє виконувати протезування з різним ступенем ампутації передпліччя. Вартість складає від £50,000 до £90,000 (в залежності від конфігурації) [5].



Рисунок 1.5 – Робот-рука Shadow Dexterous Hand

#### 1.1.6 Протез від компанії Esper Bionics

Цей технологічний стартап, розташований в Нью-Йорку, представив новий протез руки під назвою Esper Hand. Він вирізняється інтуїтивно зрозумілою технологією самонавчання, яка надає можливість передбачати рухи швидше, ніж аналогічні пристрої. Esper Hand використовує інтерфейс мозок-комп'ютер (ІМК) на основі електроміографії - комп'ютерну систему, що взаємодіє з мозковою активністю для виклику рухів.

Майже 30 неінвазивних датчиків, розташованих у гнізді кукси на шкірі користувача, реєструють електричні сигнали, відображаючи м'язову активність. Esper Hand, що важить всього 380 грамів, виготовлений з різноманітних матеріалів, включаючи поліоксиметиленовий пластик, фторопласт, нейлон, алюміній, сталь, титан, бронзу та силікон. Він пропонує п'ять рухливих пальців і здатен виконувати обертання та захоплювання об'єктів різними способами, спрощуючи повсякденні завдання, такі як відкривання пляшок, керування автомобілем або використання кухонного приладдя.

Компанія підкреслює легкість та гнучкість цієї руки, її модульні пальці, здатні до різноманітних захватів, та "спеціальний механізм", який дозволяє легко від'єднати руку, що може бути зручним при одяганні чи переодяганні. Крім того, Esper Bionics розробили свої власні цифрові міосенсиори, які ефективно читають сигнали з м'язів та передають їх на смартфон для подальшого аналізу.

Esper Bionics також розробила хмарну платформу, яку можна інтегрувати з рукою для поетапного підвищення її продуктивності. Це рішення, відоме як Esper Platform, може бути з'єднане зі смартфоном або ноутбуком користувача, отримуючи інформацію від вбудованих датчиків. Також, використовуючи цю платформу, можна налаштовувати роботу руки, змінюючи параметри, такі як швидкість реакції чи додавання та видалення нових захватів. За замовчуванням доступні різноманітні захвати, такі як узяти чи пересунути предмети, писати, або навіть ходити вулицями. Дані з програми пересилаються до хмари, де аналізуються рухи користувача для постійного вдосконалення алгоритму управління рукою та накопичення корисних даних для протезистів. У майбутньому розробники планують створювати базу даних про рухи людей та

розробляти більш продуктивні датчики та біонічні протези. Вартість цього рішення коливається від \$6000 до \$22000.



Рисунок 1.6 – Протез руки Esper Hand

1.2 Огляд механічних та електричних аспектів конструкцій робототехнічної руки.

Загалом, робототехнічна рука складається з трьох компонентів: каркасу, механіки та контролера. Корпус руки, зазвичай виготовлений із легких металевих сплавів, основною складовою частиною є титан. Однак останнім часом з розвитком 3D-друку використання пластику для виготовлення корпусу стає все поширенішим для економії вартості конструкції та досягнення антропоморфності для імітації біологічної руки та захисту внутрішніх компонентів протезу від пошкоджень.

Механічна частина робототехнічної руки включає шарніри, тяги та електричні приводи, що забезпечують рухливість. У вищорозвинених протезів кількість рухомих частин забезпечується не менше як п'ятьма приводами на кожен палець та складною системою важелів. Також, виробники пропонують можливість повороту пензля, що потребує встановлення додаткового поворотного механізму.

Електронна частина представлена електричною схемою, яка враховує мікропроцесор для обробки показань з різних датчиків та визначення позицій приводів. В залежності від складності пристрою, вона може виконувати

різноманітні функції, такі як взаємодія із зовнішніми пристроями, виведення інформації та обробка сигналів від сторонніх датчиків.

### 1.2.1 Механізми передачі руху.

Передача руху в робототехнічній руці може бути класифікована за декількома типами, а саме:

- Ниткова тяга
- Черв'ячна передача

Один із методів побудови електромеханічної руки для керування рухом пальців використовує концепцію ниткової тяги. Цей метод полягає в закріпленні еластичної нитки до кожного пальця, яку можна тягти або розслаблювати за допомогою електроприводу, розташованого в передпліччі (див. рис. 1.7).

Цей механізм володіє кількома перевагами:

1. Забезпечує високу точність та швидкодію у виконанні сигналів завдання.
2. Здатний виконувати різноманітні рухи пальців та досягає гнучкості, аналогічно справжній руці.
3. Має невисоку вартість конструкції, добру ремонтпридатність та широкий вибір матеріалів для розробки.



Рисунок 1.7 – Електроприводи механічної руки, заснованої на нитковій тязі

Проте, існують певні недоліки у використанні ниткової тяги:

1. Обмеженість рухів зап'ястя: Неможливість виконати рухи зап'ястя без виконання функцій руху пальців. Згинання або обертання протезу змінює довжину нитки, що ускладнює правильне зігнуття пальця.

2. Громіздкість конструкції: При створенні моделі, яка максимально відтворює людську модель руху всіх пальців, конструкція стає дуже громіздкою для повсякденного використання. Щоб вирішити цю проблему, можна обмежити ступінь свободи протезу, зменшивши його габарити та вагу.

3. Обмежена сила стиснення: Сила стиснення обмежена потужністю, яка керує електроприводом. У таких моделях використовуються сервомотори, які мають обмежену можливість забезпечити надійну фіксацію об'єкта при хваті протезом.

Щодо черв'ячної передачі поступального руху, рух пальців протеза в цьому випадку обмежується через великі габарити та неможливість встановлення додаткових електроприводів. Така передача дозволяє виконувати лише основні рухи, такі як хват і тріска, з обмеженою силою стиснення, але здатна ефективно утримувати та фіксувати об'єкти.



Рисунок 1.8. – Модель пальця руки, що працює на черв'ячній передачі

Черв'ячна передача ефективно утримує пальці та запобігає впливу зовнішніх факторів на їх згинання, завдяки надійному триманню гвинта. Однак ця

характеристика може також виявитися недоліком конструкції. У випадках непередбачуваних ситуацій, коли потрібно швидко розтиснути протез, а цього не вдається досягти, залишається єдиний вихід — руйнувати конструкцію.

### 1.2.2 Аналіз використовуваних в роборуках датчиків для збору інформації.

Давайте розглянемо методи формування завдань для виконавчого механізму. Ці методи можна розділити на наступні категорії:

1. Датчик вигину:
2. Електрографічний датчик ЕМГ:
3. Багатоцільовий модуль розпізнавання мовлення, який дозволяє керувати системою за допомогою мовлення.

Електроміографічний датчик, відомий також як ЕМГ, вимірює невеликі сигнали, які генеруються вашими м'язами під час руху. Ці датчики ґрунтуються на науковій установці, згідно з якою м'язи, скорочуючись, випромінюють електричну активність чи електричні імпульси, що поширюються через прилеглі кістки та тканини. Датчики ЕМГ працюють, розташовуючи електроди або органи чуття близько до групи м'язів. Сигнали датчика ЕМГ виникають від електричної активності чи потенціалу м'язових волокон, що активуються під час скорочення [7]. Цей пристрій визначається складністю в налаштуванні та управлінні: необхідно правильно розмістити датчик на конкретному місці, інакше отримані сигнали можуть бути неточними, що ускладнює точне керування положенням кінцівок.



Рисунок 1.9 – Електроміографічний датчик

Датчик вигину представляє собою пристрій, розроблений для вимірювання ступеня вигину. По суті, цей датчик є резистором, опір якого змінюється при вигинанні. Оскільки опір прямо пропорційний ступеню вигину, його також можна охарактеризувати як гнучкий потенціометр. Ця технологія може бути використана для дистанційного управління маніпулятором.

Тензодатчик – це датчик, опір якого змінюється в залежності від прикладеної сили. Він перетворює фізичні величини, такі як сила, тиск, напруга або вага, в зміну електричного опору, який можна подальше вимірювати. Коли зовнішні сили впливають на нерухомий об'єкт, виникає напруга та деформація. Напруга визначається внутрішніми силами опору об'єкта, а деформація – зміщенням та деформацією. Тензорезистори дозволяють вимірювати деформації, пов'язані з механічними елементами, і є ключовою складовою тензодатчиків для непрямого вимірювання сил, тиску, ваги, механічних напруг, крутних моментів і т.д. Дані датчики застосовуються для вимірювань кутів та зсувів, а також надають змогу аналізувати різноманітні вигини для отримання інформації про фізичний стан та/або рух пристрою. Під час розтягування провідних елементів тензорезистора збільшується їхня довжина, а поперечний переріз зменшується,

що призводить до збільшення опору тензорезистора. Навпаки, при стисканні опір зменшується. Тензодатчик характеризується високою точністю вимірювання та простотою використання, але його основним недоліком є висока вартість. Ручне керування за допомогою гнучких датчиків включає 5 датчиків гнучкості, опір яких змінюється при вигинанні. Датчики вигину, також відомі як датчики вигину, представляють собою прості у використанні датчики, спеціально призначені для вимірювання ступеня відхилення або вигину. Значення опору, виміряні при вигинанні, є аналоговими значеннями.



Рисунок 1.10 – Датчик вигину Sparkfun

Модуль розпізнавання мовлення здатний виконувати різноманітні завдання і призначений для простого впровадження універсальних, надійних та економічних можливостей розпізнавання мовлення в будь-яку програму. З його допомогою можна легко інтегрувати його з будь-яким хост-пристроєм, який має інтерфейс UART та живиться від 3,3 до 5 В, таким чином, наприклад, з платами PIC і Arduino. Цей модуль ідеально підходить для застосувань у галузі домашньої автоматизації або для додавання можливостей розпізнавання мовлення найпопулярнішим роботам на ринку. Він володіє широким спектром можливостей розпізнавання голосу, що робить його практично універсальним для різноманітних програм.





Рисунок 1.11 – Модуль EasyVR

EasyVR - це модуль нового покоління, що базується на успішному модулі VRbot другого покоління і успадковує його функції та можливості (див. Рис. 2.11) [9]. Використовуючи два методи розпізнавання голосу для різних сценаріїв використання:

1. **Speaker-independent (SI):** Використовує фонетичний алгоритм розпізнавання мови, працює з окремими мовами, такими як англійська, італійська, німецька, французька, іспанська та японська. Враховує фонетичні особливості, індивідуальність голосу не має значення. Має попередньо встановлені команди, такі як напрямки руху, ключові дії та арифметичні числа.

2. **Speaker-dependent (SD):** Використовує точний алгоритм, що відрізняє мовленнєві характеристики різних осіб. Реагує лише на голоси, які збігаються з оригінальними командами. Має режим **Speaker-verification (SV)** для створення "голосового пароля".

Можливості EasyVR включають розпізнавання до 256 фраз будь-якою мовою за алгоритмом SD, розпізнавання 26 базових фраз 6 мовами за алгоритмом SI, відтворення користувацьких звукових відповідей, синтез телефонних сигналів DTMF для управління системами розумного будинку, та спілкування з іншими аудіо пристроями за допомогою технології SonicNet, яка передає дані звуковими імпульсами повітрям.

Інтерфейси мозок-комп'ютер (ІМК) приймають сигнали з мозку, аналізують їх і перетворюють на команди, які передаються пристроям виведення для

виконання необхідних завдань. ІМК не використовують традиційні шляхи нервово-м'язового виведення. Основна мета ІМК полягає в заміні чи відновленні корисної функції у людей із порушеннями нервово-м'язової системи, такими як бічний аміотрофічний склероз, церебральний параліч, інсульт чи травма спинного мозку.

Інтерфейси мозок-комп'ютер потребують зручного, портативного, безпечного та пристосованого для роботи в різних умовах обладнання для збору сигналів. Системи ІМК повинні пройти довгострокові дослідження реального використання людьми і впроваджувати ефективні та надійні моделі для масового використання.

Крім того, необхідно покращити повсякденну та безперервну надійність роботи ІМК, щоб наблизити її до надійності природної м'язової функції.

Розвиток області технології інтерфейсу мозок-комп'ютер може відновити здатність спілкування та використання допоміжних пристроїв для людей, які мають обмеження у мовленні та руховій активності. Ця область досліджень є високоактуальною суспільною темою. Проте, як і в будь-якій новій технології, існують проблеми, пов'язані з впровадженням в клінічну практику, і ІМК не є винятком. У розгляді потенційного використання та користувачів систем ІМК будемо також розглядати обмеження та виклики, що стоять перед цією галуззю, і розглядатимемо досягнення, які можливі протягом наступних кількох років. Останнім часом був опублікований докладний огляд основних принципів, поточного стану та майбутніх перспектив технології ВСІ.

Неінвазивні інтерфейси мозок-комп'ютер (ІМК) на основі електроенцефалографії є найбільш широко вивченим методом, завдяки мінімальному ризику та відносній зручності проведення досліджень та залучення учасників. На даний момент такі програми, як правило, обмежені можливістю безперервного управління рухами з низьким рівнем вільності та дискретним вибором.

Однак захопливе майбутнє може настати лише в разі, якщо дослідники та розробники інтерфейсів мозок-комп'ютер зосередять свою увагу на вирішенні проблем у трьох ключових областях: розвитку обладнання для збору сигналів,

вдосконаленні та розповсюдженні інтерфейсів мозок-комп'ютер та забезпеченні їхньої надійності [10].

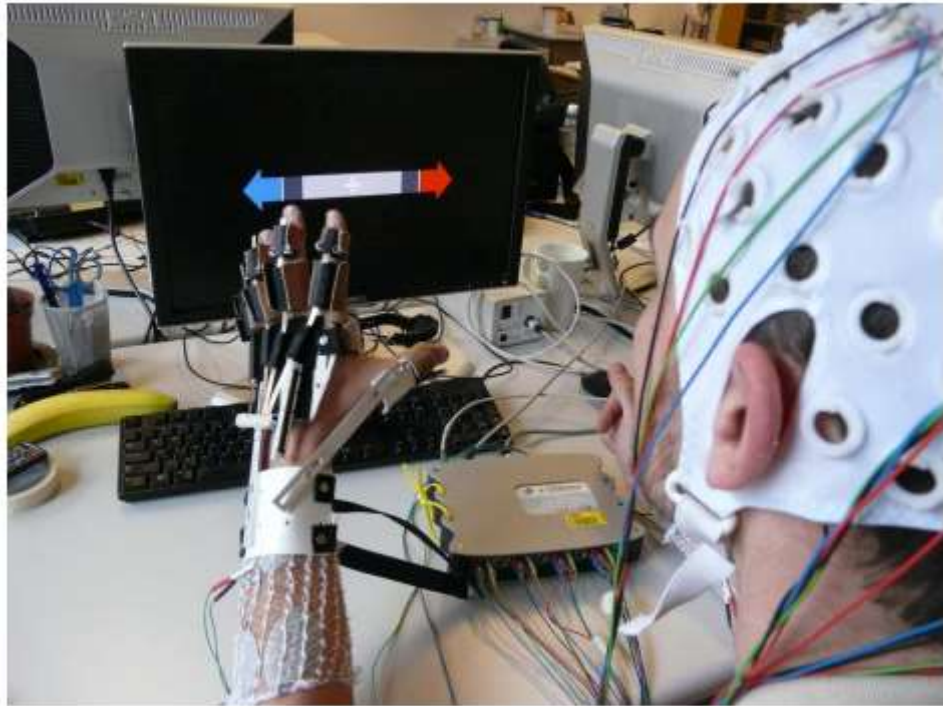


Рисунок 1.12 – Інтерфейс мозок-комп'ютер

Рука складається зі скелета кисті, який включає в себе 27 кісток: 8 кісток зап'ястка, 5 кісток п'ястки та 14 фаланг (див. рис. 1.11). Ці кістки утворюють 19 суглобів, зокрема 3 знаходяться в променево-зап'ястковому суглобі (променезап'ястковий, передзап'ястковий, тригранногоорохоподібний), 2 - на рівні зап'ястно-п'ястних суглобів (один загальний для всіх пальців та один для великого пальця), 5 - в п'ястно-міжфалангових суглобах та 9 - в міжфалангових суглобах.

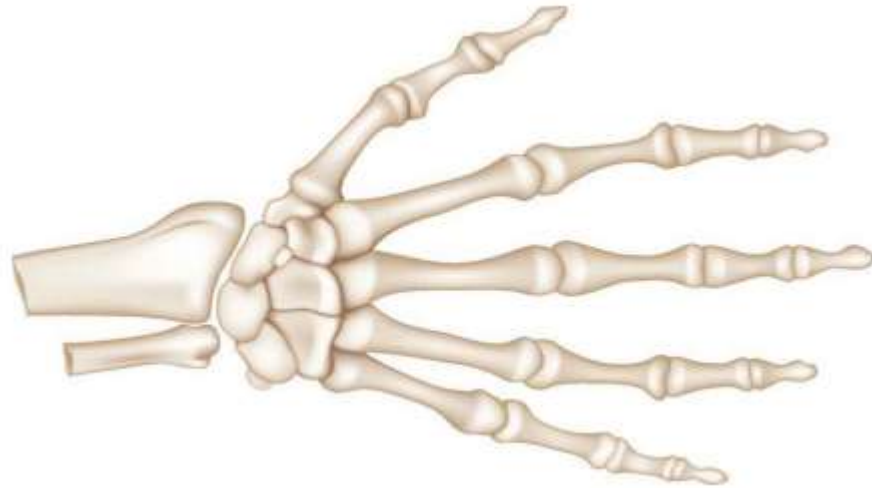


Рисунок 1.13 – Скелет кисті

Кожен з пальців кисті включає в себе скелет, що складається з низки кісток, відомих як фаланги. Проксимальні фаланги з'єднують решту пальця з п'ясними кістками, а між фалангами розташовуються рухомі міжфалангові суглоби. Зазвичай, кожен палець, за винятком великого, складається із трьох фаланг, в той час як великий палець складається лише із двох. Ці три фаланги отримали назви: основна, середня та нігтьова. Кожна фаланга представляє собою подовжену кісточку з напівциліндричною формою діяфізу (середньої частини), плоскої частини, спрямованої долонною стороною, та опуклої частини, спрямованої на зворотну сторону. Кінцеві частини фаланг (апофізи) містять суглобові поверхні [11]. Дистальний та проксимальний міжфалангові суглоби мають по одному ступені свободи для згинання-розгинання і розглядаються як обертальні суглоби. П'ястно-фаланговий суглоб має два ступені свободи завдяки згинанню-розгинанню та приведенню-відведенню, і моделюється як універсальний суглоб. Усього пальці володіють 21 ступенем свободи, інші 6 ступенів свободи припадають на обертальний та поступальний рух зап'ястя. Однак ці шість параметрів можна ігнорувати, якщо основна увага спрямована на локальні рухи пальців, а не на загальний рух.

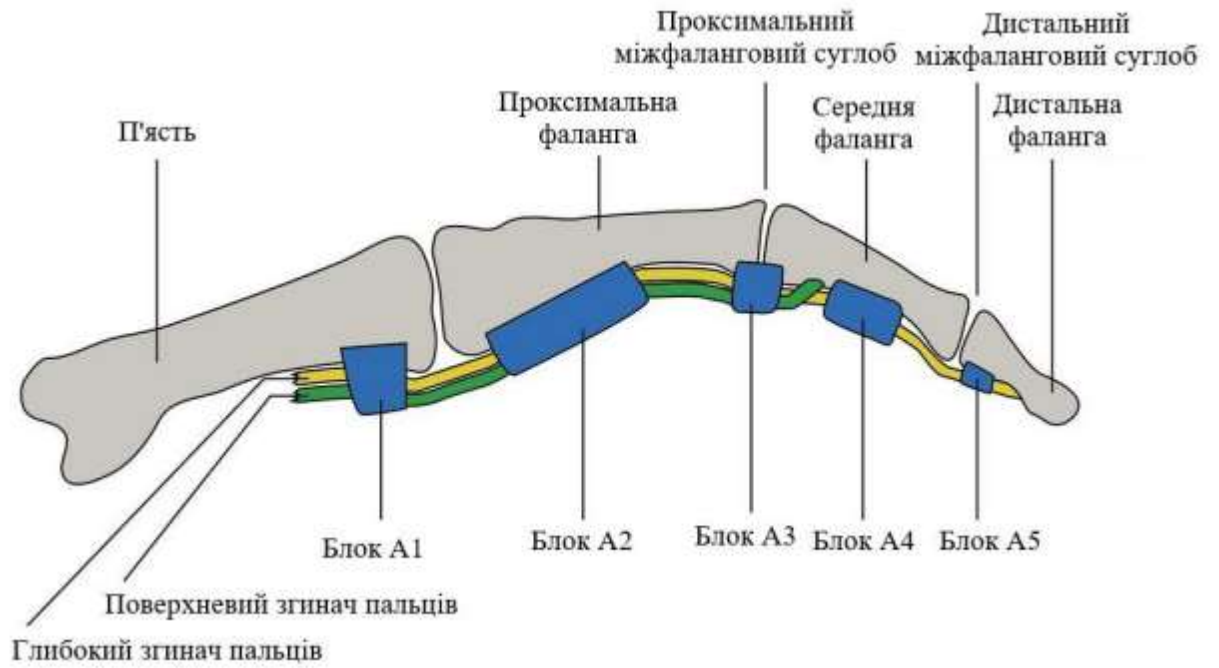


Рисунок 1.14 – Анатомія скелету пальця кисті

Модель кінематики руки передбачає, що всі шарніри є ідеально обертовими, універсальними або сферичними.

## 2 ОЦІНКА ТА ВИБІР ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОННОГО УСТАТКУВАННЯ

Аналіз існуючих рішень вказав, що для забезпечення рухів пальців та їх управління необхідне таке обладнання: 5 двигунів із вбудованими датчиками положення, датчики вигину, автономне джерело живлення та мікропроцесорна система керування.

### 2.1 Вибір двигуна

Основні вимоги до двигунів, які відповідають за рух пальців, включають їхню невелику вагу та габарити, простоту обслуговування, надійність та енергоефективність. Цим критеріям відповідають безколекторні двигуни постійного струму (БДПС або англ. BLDC – Brushless DC motor). Зростаюча популярність цих двигунів порівняно із колекторними обумовлена переходом від механічної комутації до електронної, що підвищує надійність та тривалість безаварійної роботи та зменшує витрати на обслуговування [25]. Порівняно із асинхронними двигунами, вони володіють вищим коефіцієнтом корисної дії, а також кращими показниками відношення потужності до ваги і відношення електромагнітного моменту до моменту інерції.

Безколекторні двигуни постійного струму – це синхронні двигуни із постійними магнітами, що мають трапецоїдальну форму ЕРС та керуються від датчика поточного положення ротора. Ці двигуни отримали значну популярність у різних галузях, таких як робототехніка, електричні транспортні засоби малої потужності, безшумні вентилятори, електричні інструменти, кондиціонери, жорсткі диски, CD/DVD приводи та сучасні безпроводні ручні інструменти. З урахуванням наведених вище вимог та досвіду визначених компаній, було обрано сервомотор MG996R для приводу пальців роборуки. Основні характеристики цього двигуна подано у таблиці 2.1 [12].



Рисунок 2.1 – Сервопривод Tower Pro MG996R

Таблиця 2.1 – Характеристики MG996R

Характеристики	Значення
Номінальна напруга	5 В
Робочій струм	200 мА
Робоча швидкість ( $\omega_p$ )	60 град / 0,17 с 6.16 рад/с (CI)
Обертальний момент	9.4 кг*см
Пусковий струм	2.5 А
Маса	55 г
Розмір	40,7 x 19,7 x 42,9 мм

MG996R – цифровий сервопривід, обладнаний металевими шестернями та валом, спроектований для універсального використання. Оновлена модель має поліпшений захист від ударів, перероблену систему керування на друкованій платі та мікросхему, що робить його набагато точнішим порівняно з його попередником MG995. Редуктор і двигун також пройшли модернізацію, спрямовану на зменшення зазорів в кінематичній передачі та покращення центрування. В комплект входять чотири різні насадки з отворами для кріплення на них елементів управління.

## 2.2 Датчик стискання

Система управління сервоприводом включає налагоджувальну плату та датчики тиску. Для передачі руху використовується натяг нитки. Просту в програмуванні та доступну до використання плату Arduino UNO можна використовувати для керування таким двигуном. Задачу визначення положення вирішує датчик тиску, який кріпиться до кожного пальця руки людини так, що при згинанні пальця відбувається вигинання і датчик реагує на стиснення. Вартість готового виробу з такими датчиками становить приблизно 600 гривень за одиницю. З огляду на їхню високу вартість було створено саморобні датчики, які практично не відрізняються за функціоналом від заводських і коштують значно менше. Вони складаються з фоторезистора, світлодіода і кількох резисторів. Схема підключення зображена на рис. 2.2.

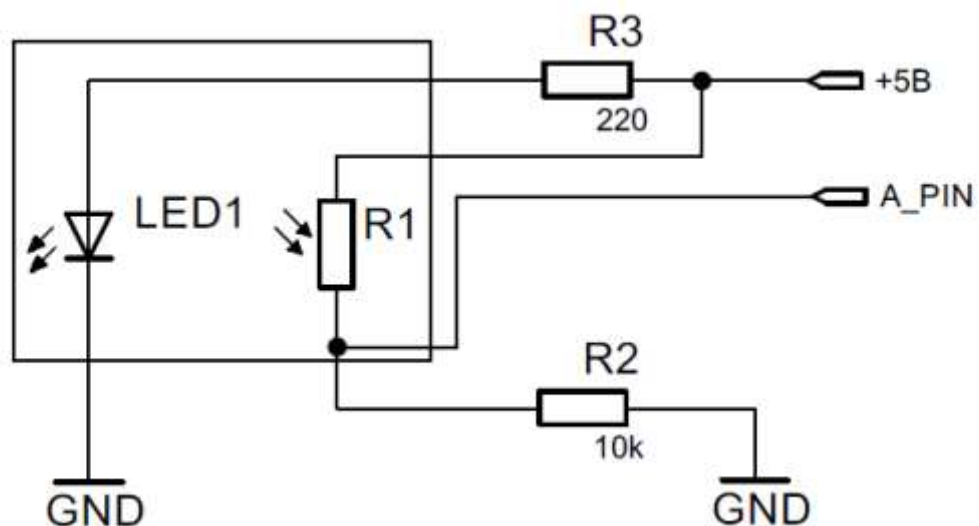


Рисунок 2.2 – Схема з'єднань датчику тиску

R1 – фоторезистор; R2 – резистор ємністю 10 кОм (підтягуючий); R3 – резистор ємністю 220 Ом (струмообмежуючий); LED1 – світлодіод; GND – земля; A\_PIN – контакт для під'єднання до аналогового входу.

Як світлодіод можна використовувати вивідний світлодіод 5 мм з прозорою лінзою, кутом свічення 35° та білим кольором.



Для схеми використовується фоторезистор СФ2-1, який представлений на рис. 2.3. Це напівпровідниковий фоторезистор на основі fotocутливих елементів сульфиду кадмію для реєстрації випромінювання у "видимому" діапазоні довжин хвиль від 0,5 до 0,8 мкм. Він призначений для роботи у складі апаратури фотоелектричної автоматики та випускається у пластмасовому корпусі. Його характеристики представлені в таблиці 2.2.



Рисунок 2.3 – Фоторезистор СФ2-1

Таблиця 2.2 – Характеристики СФ2-1

Характеристики	Значення
Робоча напруга, $U_p$	15 В
Світловий струм, $I_{св}$	500 мкА
Темновий струм, $I_t$	1 мкА
Темновий опір, $R_t$	15 МОм
Постійна часу спаду струму, $\tau_{сп}$	40 мс
Постійна часу наростання струму, $\tau_n$	90 мс
Максимум спектрального розподілу, $\lambda_{max}$	0.65 мкм
Маса, г	0.5

### 2.3 Плата керування

Для управління електромеханічною рукою була обрана плата Arduino Uno (зображена на рисунку 2.4). Контролер Arduino Uno базується на мікросхемі ATmega328. Платформа обладнана 14 цифровими входами/виходами (із яких 6 можуть використовуватися як виходи ШІМ), 6 аналоговими входами, 16-мегагерцовим кварцовим генератором, USB-роз'ємом, силовим роз'ємом, роз'ємом

ICSP та кнопкою перезавантаження. Для роботи платформу необхідно підключити до комп'ютера через кабель USB або подавати живлення за допомогою адаптера AC/DC або батареї. Робоча напруга плати Arduino Uno – 5 В, проте наявний стабілізатор напруги, що дозволяє подавати живлення з різних джерел. Живлення може надаватися через USB або зовнішній адаптер з рекомендованою напругою від 7 до 12 В. Є роз'єми для підключення живлення через вбудований роз'єм DC 2.1 мм або напряму до входу VIN за допомогою проводів. Також можливе живлення від USB-порту комп'ютера, проте в цьому випадку напруга 5 В подається безпосередньо на пін 5V, і необхідно уникати перевищення напруги, оскільки це може призвести до поломки пристрою [13][14].



Рисинок 2.4 – Плата Arduino Uno

Мікроконтролер ATMEGA328-AU (показаний на рисунку 2.5) представляє собою високопродуктивний 8-розрядний мікроконтролер, що базується на архітектурі AVR RISC. Він поєднує у собі 32 КБ флеш-пам'яті ISP з можливістю програмованого обчислення під час запису, 1 КБ EEPROM, 23 універсальні введення/виведення, 32 універсальних регістри, три гнучких лічильника/таймера з режимом порівняння, внутрішні та зовнішні переривання, програмований USART, двохпровідний інтерфейс, порт SPI, 6-канальний 10-бітний аналого-цифровий перетворювач (або 8-канальний для корпусів TQFP і QFN/MLF), програмований сторожовий таймер з внутрішнім генератором і п'ятьма режимами енергозбереження. Мікроконтролер працює в діапазоні напруги від 1.8 до 5.5 В. Завдяки повній потужній інструкції одного циклу, пристрій забезпечує пропускну

здатність 1 MIPS на 1 МГц, що дозволяє розробникам систем оптимізувати енергоспоживання відповідно до потреб обробки.

Таблиця 2.3 – Характеристики мікроконтролер АТmega328

Напруга живлення	1,8 – 5,5 В
Розрядність АЦП	10 біт
Кількість I <sup>2</sup> C	1
Кількість SPI	1 Master/Slave
Об'єм SRAM	2 кб
Кількість аналогових входів	6
Кількість каналів ШІМ	6
Тактова частота	0 – 20 МГц
Об'єм Flash-пам'яті	32 кб
Об'єм EEPROM-пам'яті	1 кб
Споживаний струм у режимі роботи	0,2 мА (1 МГц, 1,8 В)
Споживаний струм у режимі сну	0,75 мкА (1 МГц, 1,8 В)
Кількість таймерів/лічильників	2 восьмибітних, 1 шістнадцятибітний
Загальна кількість портів	23
Кількість апаратних USART (Serial)	1



Рисунок 2.5 – Мікроконтролер АТМЕГА328

## 2.4 Оцінка та вибір електричного та електронного устаткування.

Виконаємо обчислення енергетичної ємності акумуляторної батареї, яка є необхідною для забезпечення автономної роботи робототехнічної руки. Здійснимо визначення необхідної потужності:

$$Q = P_n * t = 6 * 24 = 144 \text{ Вт * год} \quad 2.1$$

Де  $P_n$  - номінальна потужність;  $t$  - час роботи.

Використовуємо літій-полімерну акумуляторну батарею як незалежне джерело енергії завдяки значним перевагам цього типу акумуляторів. Для забезпечення довготривалої роботи батареї обмежимо використовувану ємність, яка становитиме приблизно 70% від повної ємності. Враховуючи це, проведемо перерахунок необхідної ємності акумуляторної батареї:

$$Q_n = Q * 0.7 = 144 * 0.7 = 100.8 \text{ Вт * год} \quad 2.2$$

При урахуванні напруги електропривода  $U = 5 \text{ В}$  енергетична ємність буде розрахована наступним чином:

$$Q' = \frac{Q_n}{U} = \frac{100.8}{5} = 20.16 \text{ А * год} \quad 2.3$$

Отже, ми обираємо акумулятор Xiaomi Mi Power Bank 3 від компанії Xiaomi, який представлений на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Акумулятор батарея Xiaomi Mi Power Bank 3

Основні технічні характеристики АКБ занесено до табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Паспортні дані АКБ Xiaomi Mi Power Bank 3

Характеристики	Значення
Тип батареї	Li-Polymer
Ємність	30000 мА·год
Номінальна ємність	18000 мА·год (5 В)
Ємність	111 Вт·год
Потужність	45 Вт
Напруга акумулятора	3.7 В
Вхідний струм	2-3 А
Вихідний струм	3 А
Макс. вихідний струм	3.6 А
Макс. струм на USB	2.4 А
Час зарядки	7.5 год
Захист від короткого замикання	є
Захист від перегріву	є
Захист від перевантаження	є
Розміри	154.5x72.3x38.9 мм
Вага	665 г

## 3 ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ АНТРОПОМОРФНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ РУКИ

Обрана конструкція антропоморфної робототехнічної руки передбачає інтегровану співпрацю різних елементів, які розташовані в єдиному корпусі, що імітує структуру кисті руки. Ключовим компонентом протезу є привід, який забезпечує контрольовану рухливість як загальної кисті, так і окремих пальців. Робототехнічний пристрій обладнаний електронною платою управління, яка генерує сигнали для управління та приймає сигнали від встановлених датчиків. Для живлення керуючої плати та приводу використовується електричний акумулятор.

### 3.1 Дизайн робототехнічної руки

Існують два основних типи конструкцій робототехнічних рук:

1. Роботизовані руки: Ці руки прості та прямолінійні у виконанні операцій, їх можна порівняти з дво- або трьохпальцевим захватом, що надійно виконує різноманітні завдання.

2. Складні руки із п'ятьма пальцями: Ці руки призначені для повної імітації людських рук. Якщо вимагається максимальна схожість з людською рукою, то такий робот повинен мати п'ять пальців.

За принципом роботи функціональні робототехнічні руки поділяють на два види:

- Тяговий: Управління відбувається за допомогою тяг, і такі пристрої повністю контролюються силою людини. Такий протез може функціонувати від плечової, ліктьової або променезап'ясткової частини верхньої кінцівки. Він може реагувати на зусилля фаланг пальців, що дає можливість хворому контролювати силу стискання та швидкість руху. Такі механізми легкі у обслуговуванні, мають просту конструкцію та можуть використовуватися у воді. Однак їхня основна слабкість полягає в обмежених силах захоплення через фізичні можливості людини.

- Біонічний: Ці пристрої створюються з ідеєю максимальної імітації біологічної структури людської кінцівки, зокрема, кисті руки. Вони використовують біонічні матеріали та механізми, що намагаються відтворити природні рухи та функції руки.

Ці два підходи мають свої переваги та недоліки, і вибір залежить від конкретних вимог та можливостей користувача.



Рисунок 3.1 – Конструкція робототехнічної руки на основі тяги

Біонічні протези представляють собою передові конструкції, спрямовані на надання користувачеві максимального комфорту, хоча їх вартість є високою. Ці пристрої характеризуються високим технологічним рівнем. У біонічних протезах рух пальців і кисті керується сервоприводами, сигнали для яких передаються спеціалізованим процесором. Така конструкція дозволяє виконувати тонкі роботи та реагувати з мінімальною затримкою. Завдяки цьому, людина може виконувати різноманітні види діяльності. Однак у цій конструкції є кілька недоліків: висока

вартість, потреба у періодичній підзарядці та обмежена стійкість до води. Хоча дощ не становить загрози, проте приймати душ чи плавати з протезом не можливо. Біонічний протез включає в себе індивідуальні сервоприводи для кожного пальця, можливість регулювання швидкості пропорційно, обробку сигналів потужними мікропроцесорами для досягнення високої швидкості та точності відгуку, різноманітні типи хватів та положень зап'ястя для різних ситуацій, конструкцію високої міцності для опрацювання великих навантажень та покращену поверхню подушечок пальців для збільшення зчеплення з предметами.



Рисунок 3.2 – Конструкція біомеханічної робототехнічної руки

### 3.2 Створення електромеханічного макету руки

Проаналізувавши інформацію з наведених джерел, була визначена необхідність розробки електромеханічної руки з простою конструкцією. Для цього передбачено створення конструкції, яка буде одночасно простою, міцною, легко замінною, доступною та простою в управлінні, щоб кожен користувач мав можливість використовувати її.

Основні характеристики розробленого макету включають:

- Виготовлення конструкції макету на 3D-принтері, що забезпечить механізму достатню міцність при невеликій вартості. Цей спосіб виготовлення



також дозволяє створювати модульні конструкції та легко замінювати пошкоджені модулі.

- Використання натягу тросу електроприводу як рушія пальців, забезпечуючи надійне захоплення.
- Використання сервоприводу як електроприводу, оскільки цей вибір обумовлений можливістю точного та плавного переміщення, безшумністю, легкістю монтажу та прийнятною ціною.

### 3.2.1 Конструкція

Для даного проекту вибрано біоелектричну модель руки, що використовує сервоприводи, окремий привід для кожного пальця. Цей варіант моделі є функціональним, надійним і здатним виконувати різноманітні хвати. Основною метою є створення прототипу цього пристрою.

Розглянемо конструкцію руки. На малюнках 3.3-3.4 представлена модель кисті та передпліччя з використанням сервоприводів. Ця модель створена за допомогою 3D-моделювання у графічному середовищі FreeCAD. FreeCAD - це система параметричного 3D-моделювання, спрямована в першу чергу на вирішення завдань у галузі машинобудування, але вона також підтримує інші області випадков, де необхідно моделювати об'ємні об'єкти з високою точністю та контролем над історією моделювання.

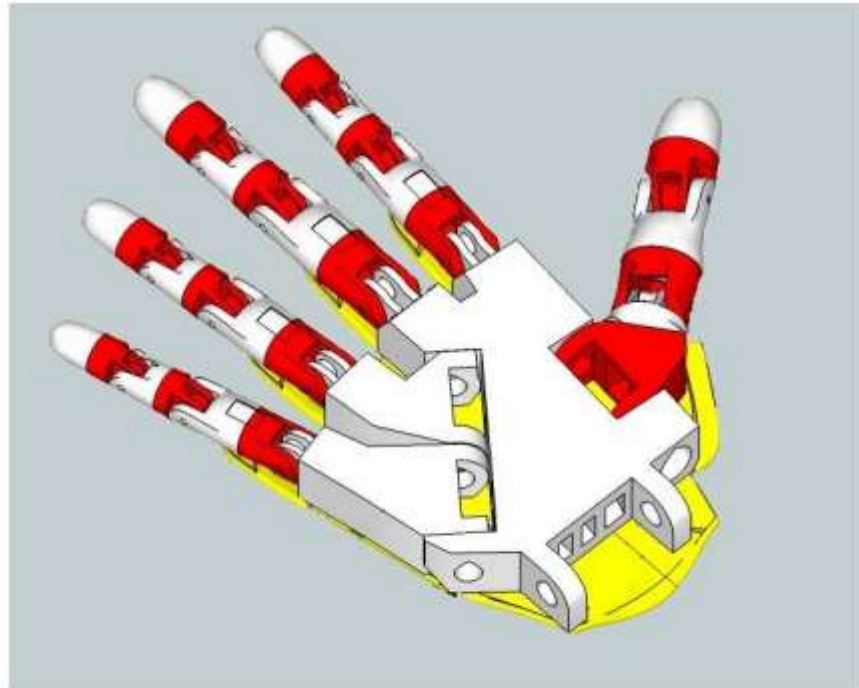


Рисунок 3.3 – 3D модель зібраної моделі кисті біоелектричного протеза

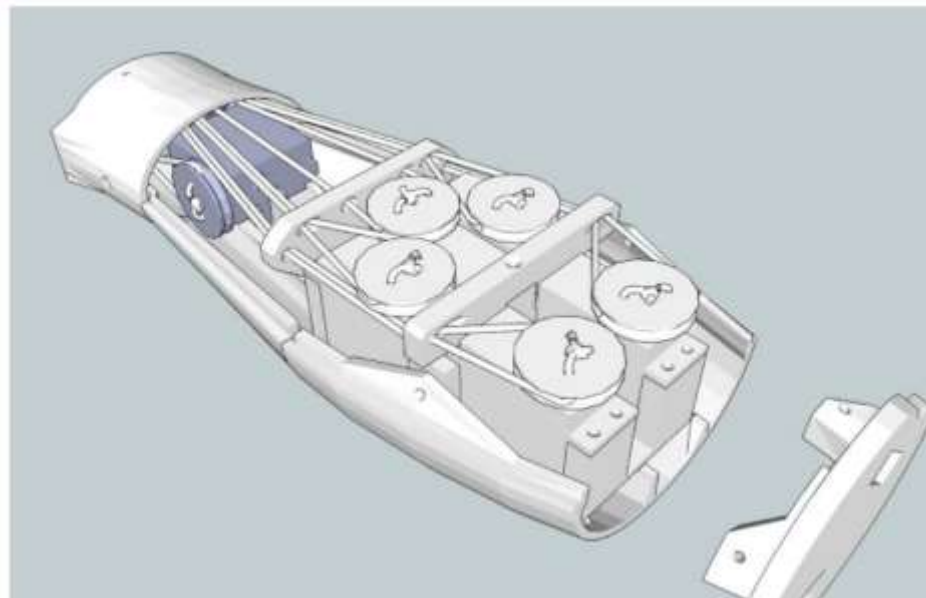


Рисунок 3.4 – 3D-модель зібраної моделі передпліччя біоелектричного протеза

### 3.2.2 Каркас

Структура каркасу робототехнічної руки виготовлена за допомогою 3D-принтера. У першому етапі роботи необхідно імпортувати 3D-моделі в середовище для подальшого друку на 3D-принтері; файли повинні бути у форматі STL. Конструкції, призначені для друку, представлені на малюнках 3.5-3.8.

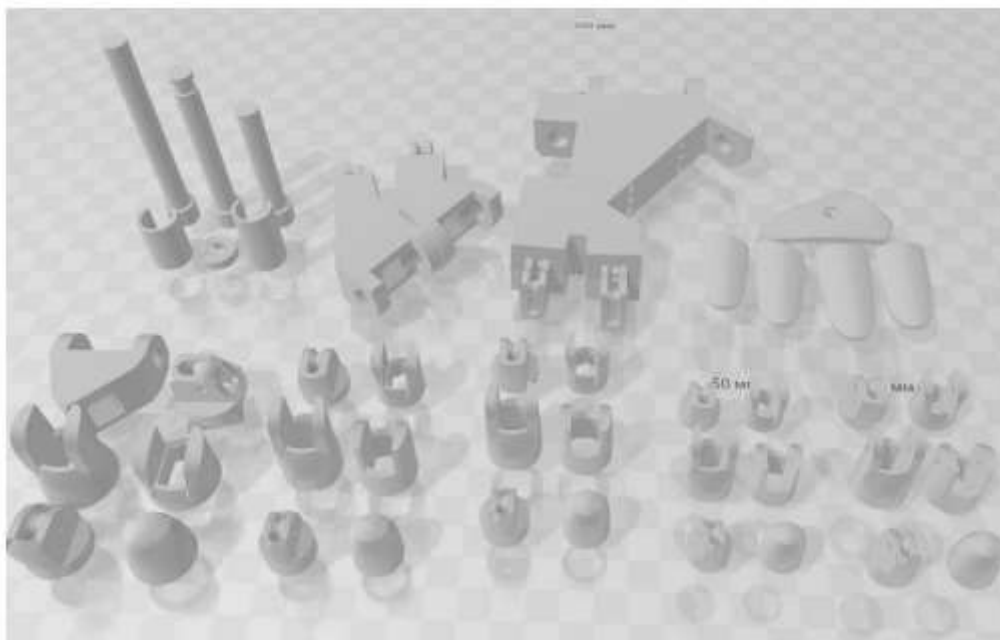


Рисунок 3.5 – Конструкції пальців та долоні руки

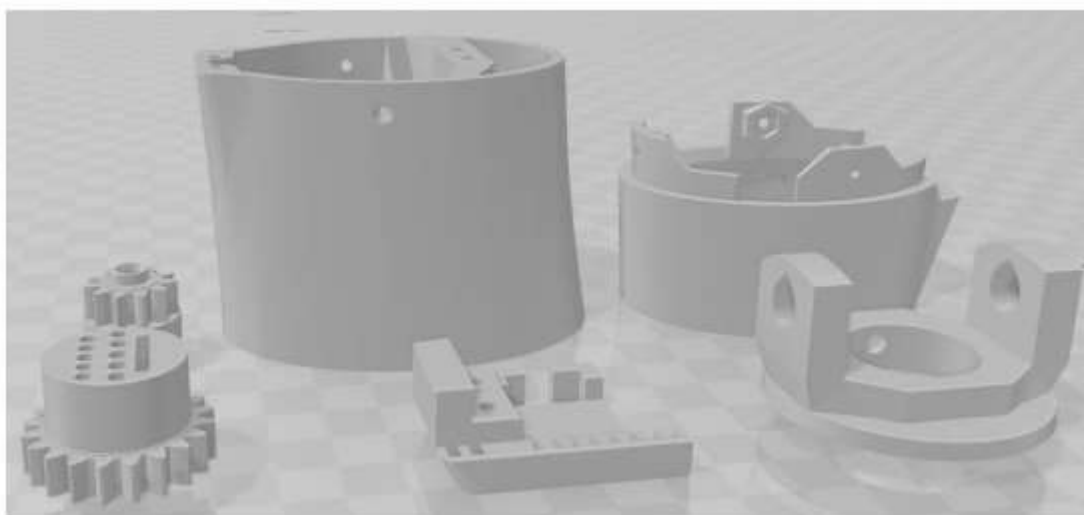


Рисунок 3.6 – Конструкції для передпліччя руки

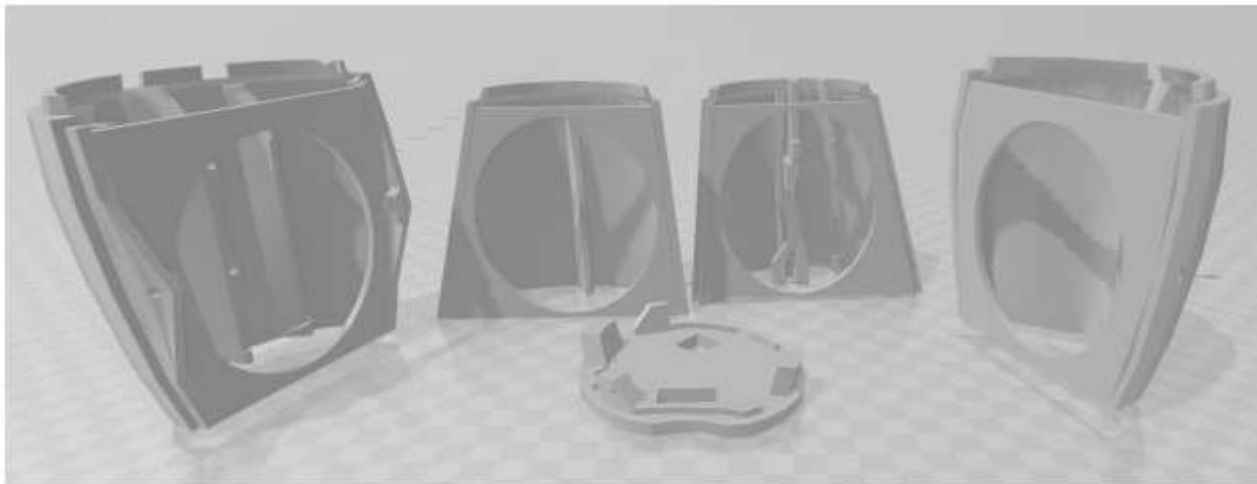


Рисунок 3.7 – Конструкції для зап'ястя

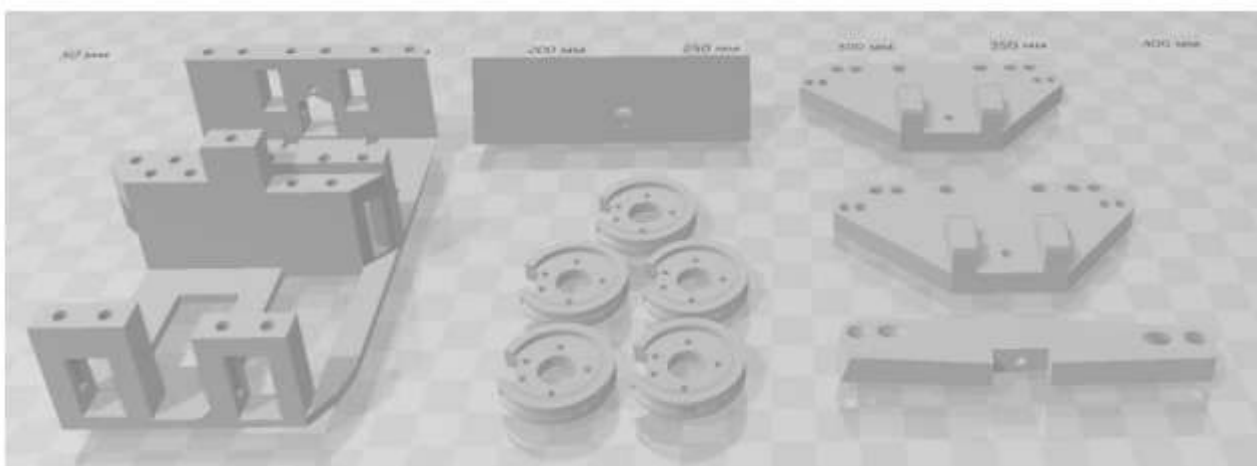


Рисунок 3.8 – Конструкції для сервоприводів

Другий етап включає процес 3D-друку на принтері. Для виконання цього завдання необхідно:

- Вибрати відповідний принтер, придатний для друку деталей.
- Обрати технологію друку, що найбільше підходить для потреб проекту.
- Вибрати матеріал, який буде використовуватися для виготовлення деталей.
- Задати товщину друку для кожного шару матеріалу.

3D-принтер – це, по суті, верстат з ЧПУ (числовим програмним управлінням), який виконує тільки операції адитивного синтезу, тобто додає матеріал для створення об'єкта. Зазвичай використовується метод пошарового нанесення матеріалу, але також існують методи безперервного формування

об'єкта з рідкого фотополімеру, коли деталь формується повністю, без поділу на шари.



Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд 3D-принтера

3D-друк є процесом адитивного виробництва, що відрізняється від традиційного субтрактивного методу. У відміну від субтрактивного виробництва, де матеріал видаляється, 3D-друк додає матеріал шар за шаром, утворюючи або вирощуючи об'єкт. На початковому етапі принтер зчитує дані з креслення або 3D-моделі, після чого починається пошарове накладання матеріалу. Ці шари, що складаються з листового матеріалу, рідини або порошку, поступово об'єднуються, створюючи остаточну форму об'єкта.

Основні методи 3D-друку включають:

1. Технологія FDM (пошарового плавлення пластиком): Застосовується плавлення пластикової нитки, яка подається в екструдер. Процес полягає в нанесенні пластикової нитки на рухливу платформу шар за шаром.

2. Технологія SLA (лазерної стереолітографії): Використовує фотополімерну рідину, яка твердне під впливом лазера, формуючи об'єкт шар за шаром.

3. Технологія DLP (Digital Light Processing): Застосовує світловий проектор для затвердження рідкого полімеру, який доливається у платформу під час друку.
4. Технологія SLS (вибіркового лазерного спікання): Використовує порошок, який спікається лазерним променем, формуючи шар за шаром.
5. Метод MJM (Multi Jet Modeling): Використовує ультрафіолетовий спалах для затвердження полімеру, який наноситься на платформу голівкою, утворюючи шари за допомогою галогенової лампи.

Зазвичай для 3D-друку використовують пластик різних характеристик, який постачається у вигляді шнура, намотаного на катушку або нарізаного соломкою. Два основних типи пластику, які широко використовуються – це ABS та PLA.

ABS – це безпечний та не токсичний пластик, ідеальний для виготовлення дитячих виробів, і його можна використовувати в присутності дітей. Вироби з ABS відрізняються високою міцністю та тривалим терміном служби. Однак є недолік – матеріал втрачає свою привабливість при впливі сонячного світла та низьких температурах. Частіше він використовується у професійному виробництві деталей.

PLA (полілактид) має інші характеристики. Він більш пластичний та дозволяє створювати складніші форми. Будучи виготовленим з кукурудзи та цукрової тростини, PLA є природнім продуктом і повністю розкладається на екологічно чисті компоненти. Вироби з PLA володіють високою стійкістю до стирання та зберігають свою геометрію, що робить їх ідеальними для виготовлення рухомих елементів. У загальному, PLA часто вибирають для аматорських проектів.



Рисунок 3.10 – Нить пластика для 3Д-принтера

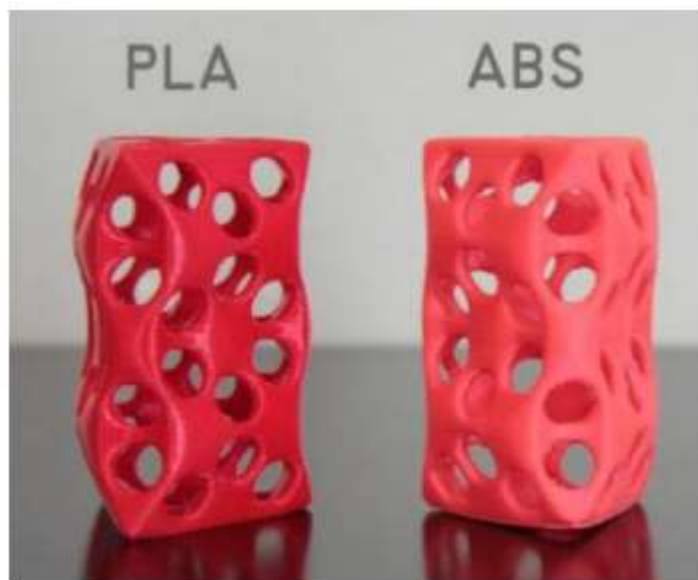


Рисунок 3.11 – Приклад друку деталей використовуючи ABS та PLA пластик

Для 3D-друку не лише пластик, але й інші матеріали можуть бути використані. Ось кілька альтернатив:

1. Нержавіюча сталь: Застосовується виключно у високопрофесійному обладнанні, він надає значні можливості для виготовлення деталей.
2. Дерево: Насправді це не чисте дерево, а полімерна суміш з дерев'яною добавкою. Висока вартість, але не потребує особливих навичок. Вироби виглядають тепло та мають природний зовнішній вигляд.

3. Смола: Цей матеріал не є дешевим, але його можна використовувати для друку високоточних, гладких та міцних деталей. Під впливом сонця смола може втратити прозорість.

4. Нейлон: Використовується переважно для виробництва промислових та медичних компонентів.

Коли ми друкуємо в 3D, модель розділяється на безліч шарів, і їх фізично конструюють. Важливим параметром є висота кожного шару, яка впливає на якість та роздільну здатність виготовленого виробу. Зазначені висоти шарів для різних технологій 3D-друку вказують на мінімальні розміри шару, що формується, де тонший шар означає вищу якість деталей, але збільшує час друку.

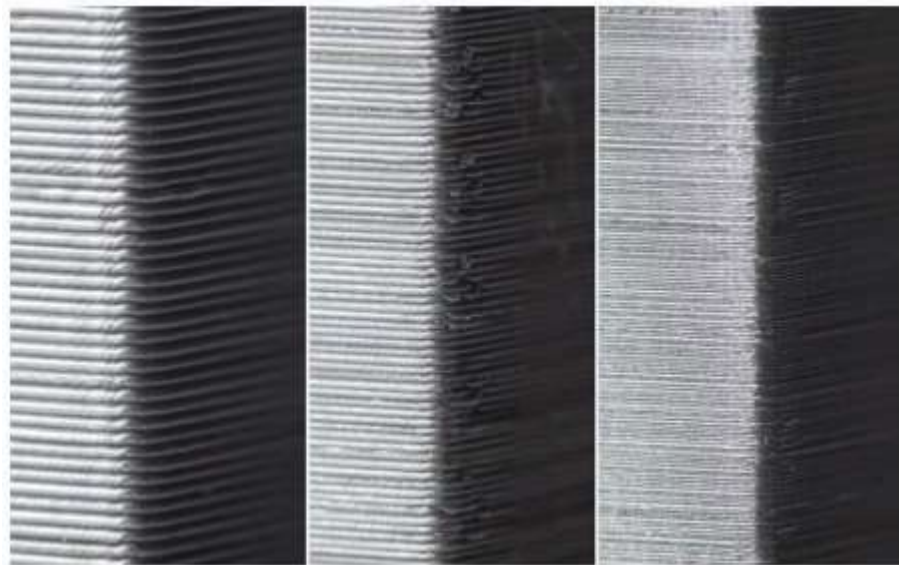


Рисунок 3.12– Приклад друку при товщині шару 50, 200 та 300 мікрон, справа наліво

Для створення моделі були вибрані такі параметри:

- Технологія: Пошарове плавлення пластиком (FDM).
- Матеріал: ABS пластик.
- Товщина шару: 100 мікрон.
- Заповнення: 100%.



## 4 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БЕЗКОЛЕКТОРНИМ ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### 4.1 Функціональна діаграма системи керування.

Безколекторний двигун постійного струму – це синхронний двигун із постійними магнітами (СДПМ) та трапецоїдальною ЕРС в замкненій системі (рис. 4.1), реалізований за допомогою датчика положення ротора (ДПР), перетворювача координат (ПК) та силового напівпровідникового перетворювача (СПП). На виході силового напівпровідникового перетворювача формується імпульсна напруга (струм) на обмотці машини. Безколекторний двигун постійного струму входить до замкненої системи формування напруги, де напруга генерується в залежності від положення ротора.

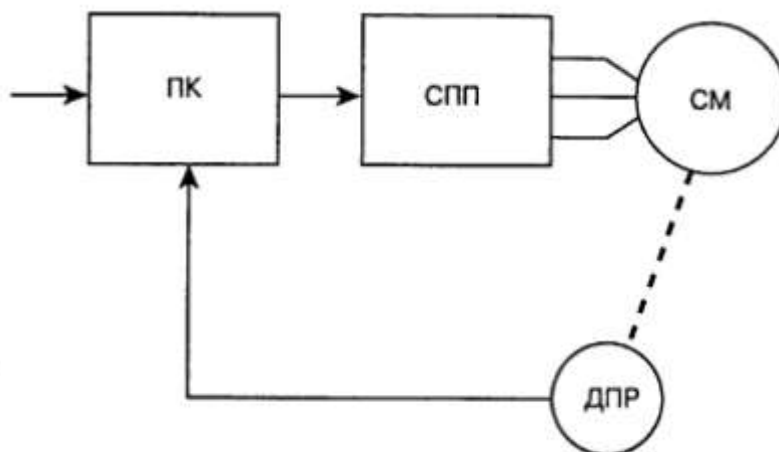


Рисунок 4.1 – Функціональна схема безколекторного двигуна постійного струму

Двигун розглядається як машина постійного струму, де комутатор утримує напрямок обмотки, який перпендикулярний до осі магнітного потоку. Частота подачі напруги залежить від кутової частоти обертання ротора. Основний принцип функціонування двигуна полягає в використанні датчика положення ротора, перетворювача координат і силового напівпровідникового перетворювача. Ці компоненти взаємодіють так, що на обмотках статора машини формуються

фазні напруги так, щоб результуючий вектор напруги завжди знаходився у положенні, зсунутому на 90 градусів і непорушному щодо осі магнітного поля ротора. Функціональна схема системи управління швидкістю BLDC наведена на рис. 4.2.

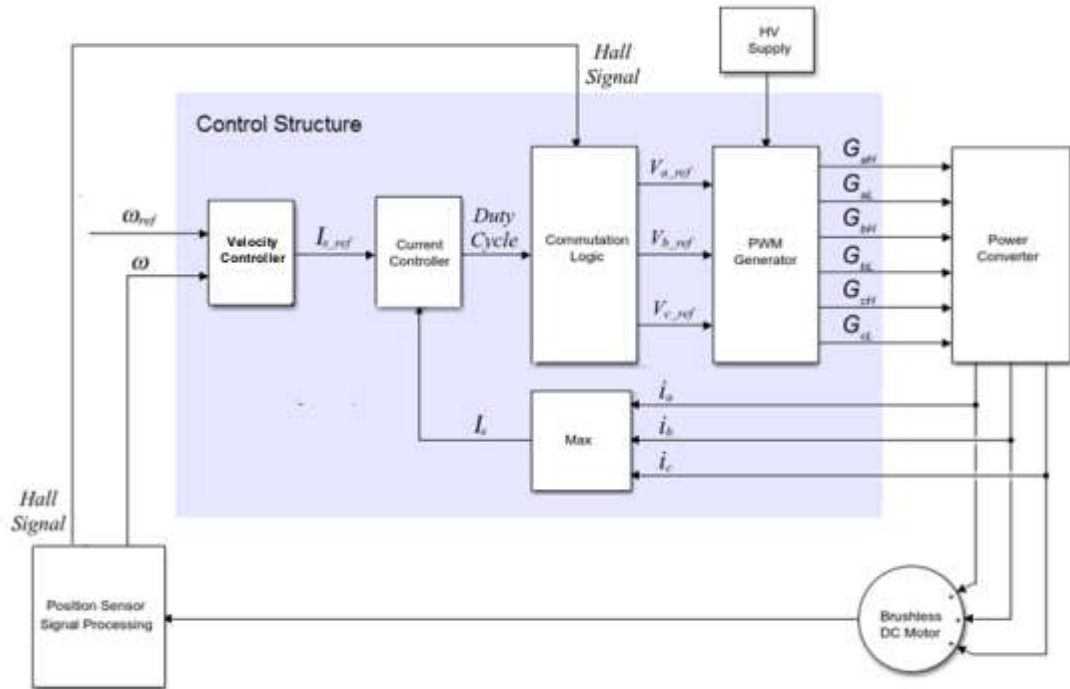


Рисунок 4.2– Функціональна схема системи керування швидкістю BLDC

На схемі позначені наступні елементи: Регулятор швидкості (Velocity Controller) – відповідає за регулювання швидкості; Регулятор струму (Current Controller) – відповідає за регулювання струму; Блок реалізації логіки комутації для безколекторних двигунів постійного струму (Commutation Logic) – відповідає за реалізацію логіки комутації для безколекторних двигунів; Блок широтно-імпульсної модуляції (PWM Generator) – відповідає за генерацію широтно-імпульсних сигналів; Блок перемикачів та перетворювачів для перетворення енергії (Power Converter) – відповідає за перемикачі та перетворювачі для енергетичного процесу; Блок максимального значення (MAX) – відповідає за обмеження значень; Високовольтне джерело енергії (HV Supply) – постачання високовольтної енергії; Безколекторний двигун постійного струму (Brushless DC Motor) – сам двигун; Датчик положення та обробка сигналів (Position Sensor and

Signal Processing) – відповідає за вимірювання положення та обробку сигналів з датчика. Якщо потрібно впровадити систему керування положенням, то схему на рис. 4.2 доповнює контур регулювання положення. Регулятор швидкості безколекторного двигуна (ESC - Electronic Speed Controller) іноді також називають контролером безколекторного двигуна або приводом безколекторного двигуна.

#### 4.2 Втілення апаратної складової електроприводу.

Апаратна реалізація системи, зображена на рис. 4.2, представлена на рис.

4.3.

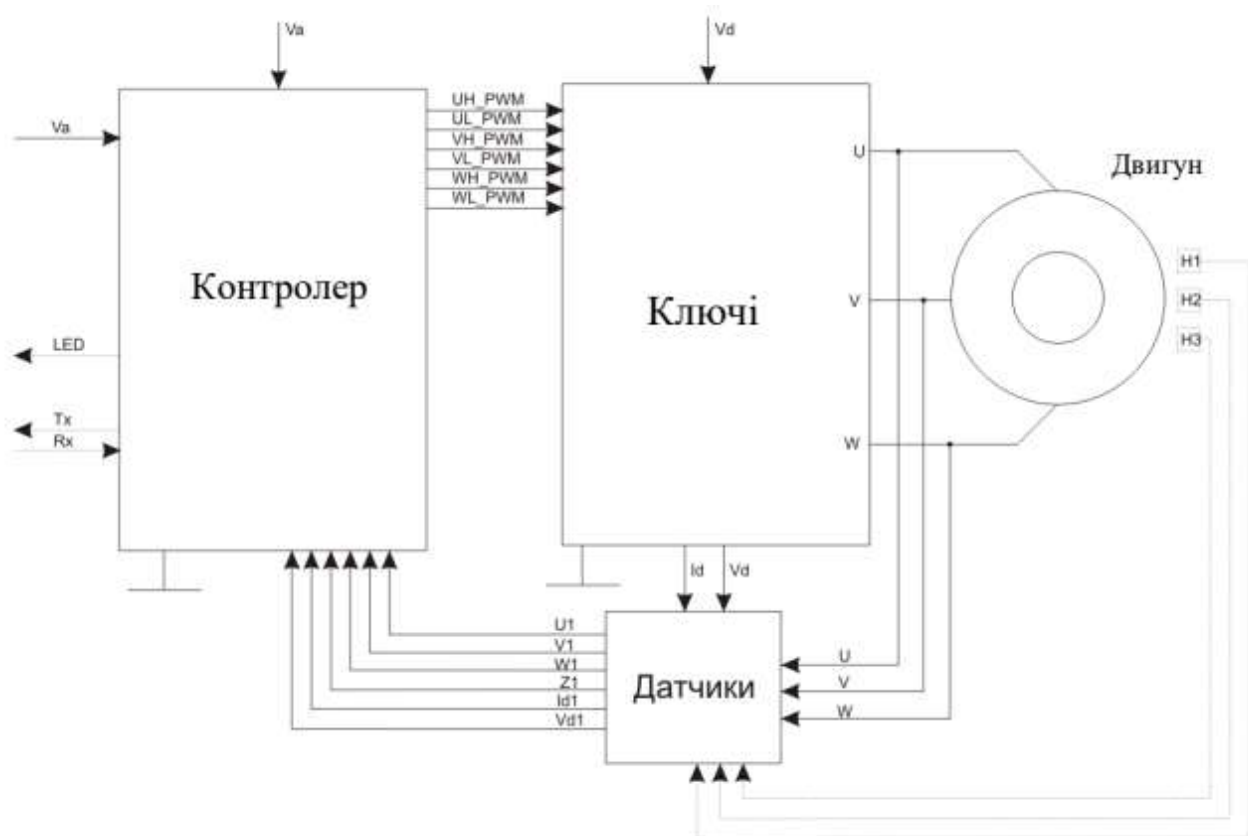


Рисунок 4.3 – Апаратна реалізація системи позиційного електроприводу на базі безколекторного двигуна постійного струму

Давайте розглянемо регулятор як складову частину з наступними модулями: Модуль контролера - отримує вхідні сигнали для визначення, приймає сигнали від датчиків і генерує керуючі сигнали для електронних ключів. Модуль електронних ключів управляє електронними ключами. Модуль датчиків включає різноманітні

датчики і схеми взаємодії. Вхідними сигналами для контролера є: напруга від трьох фаз  $U1$ ,  $V1$ ,  $W1$  (або сигнали від датчиків положення  $H1$ ,  $H2$ ,  $H3$ , для регулятора, який використовує двигун із датчиками положення); напруга середньої точки або напів-напруги живлення  $Z1$  (не потрібна для регулятора, який взаємодіє з двигуном із датчиками положення); сигнал датчика струму двигуна ( $I_{d1}$ ); напруга живлення двигуна ( $V_{d1}$ ); керуючий сигнал для заданої швидкості обертання двигуна ( $V_a$ ). Основними вихідними сигналами є: широкоімпульсні модульовані (ШИМ) сигнали на шести ключах ( $U_H\_PWM$ ,  $U_L\_PWM$ ,  $V_H\_PWM$ ,  $V_L\_PWM$ ,  $W_H\_PWM$ ,  $W_L\_PWM$ ). Додаткові сигнали включають: сигнали для управління та індикації, такі як світлодіодний індикатор (LED), сигнали для налаштування регулятора через термінал ( $T_x$ ,  $R_x$ ) і можливі інші сигнали, такі як від датчиків температури ключів і двигуна, перемикача напрямку обертання (реверс) тощо, в залежності від конкретних вимог. Також можуть використовуватися специфічні датчики, які необхідні для вирішення конкретних завдань. Передбачається, що двигун має три фази, і на кожному етапі часу "+" або "-" живлення подається на різні фази, і це реалізується за допомогою електронних ключів (див. рис. 4.4).

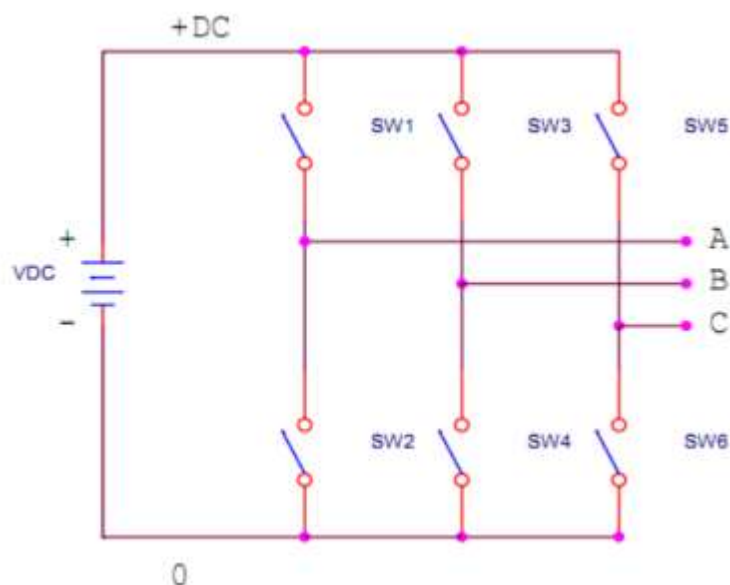


Рисунок 4.4 – Мостова схема ключів

Замикавши ключ  $SW1$ , ми подаємо "+" на фазу  $A$ , а замикавши  $SW6$ , ми подаємо "-" на фазу  $C$ . Таким чином, струм протікає від "+" батареї через фази  $A$  і

С. Для забезпечення оберненого напрямку, відкриваємо SW5 і SW2. В цьому випадку струм протікає від "+" батареї через фази С та А у зворотному напрямку. При роботі двигуна одночасно повинен бути відкритий лише один верхній ключ і один нижній ключ. При зміні стану необхідно відразу вимкнути пару ключів, зачекати на закриття ключів і тільки після цього увімкнути іншу пару ключів. Напругу на обмотки слід подавати в залежності від положення двигуна. Розглянемо керування двигуном, де в якості датчиків положення використовуються датчики Холла. Використовуються 3 датчики з дискретними виходами, і на рис. 4.6 представлена схема, згідно з якою напругу слід подавати на обмотки в залежності від сигналів від датчиків Холла.

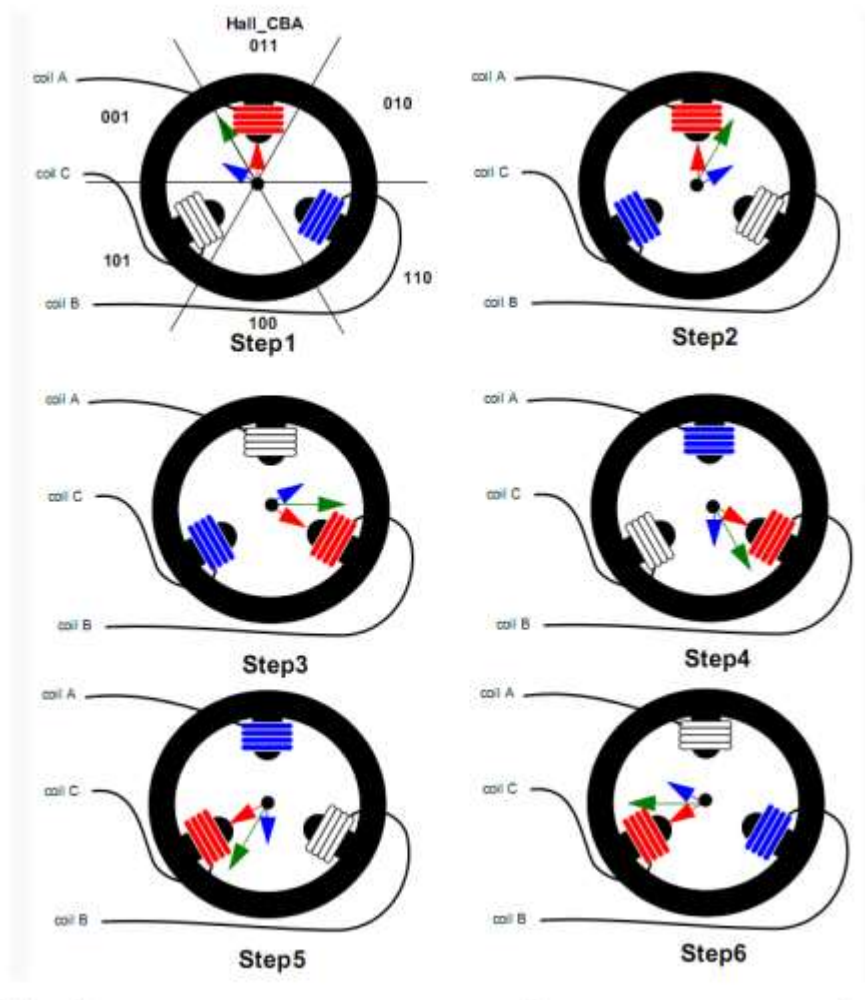


Рисунок 4.6 – Схема подання напругу на обмотки в залежності від сигналів

Часова діаграма зображена на рис. 4.7.

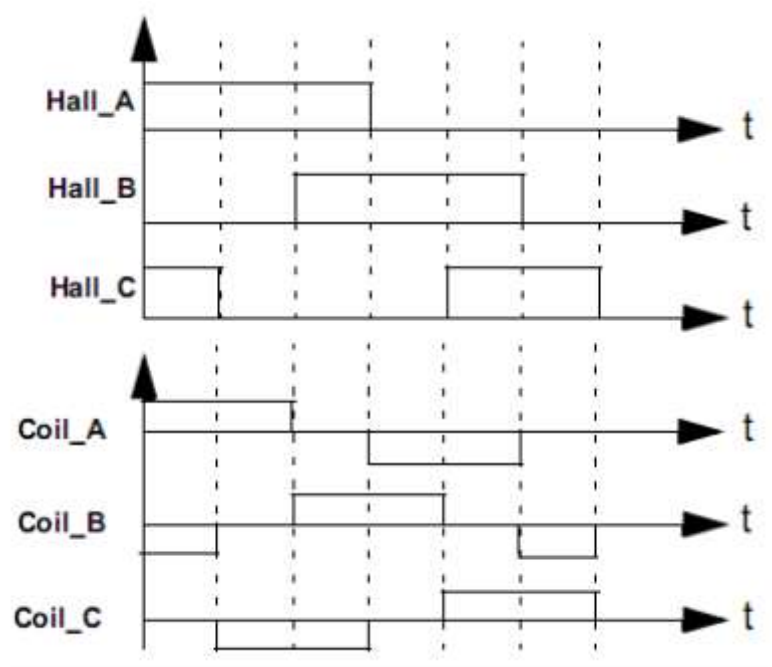


Рисунок 4.7 – Часова діаграма підключення обмоток

Таблиця 4.1 – Таблиця включення ключів залежно від сигналів датчиків Холла

Значення датчику Холла	Фаза	Ключі
101	A-B	SW1; SW4
001	A-C	SW1; SW6
011	B-C	SW3; SW6
010	B-A	SW3; SW2
110	C-A	SW5; SW2
100	C-B	SW5; SW4

## 5 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ БЕЗКОЛЕКТОРНОГО ТИПУ

Для системи необхідно створити математичний опис електродвигуна. У останніх версіях пакету Matlab 2022b (починаючи з Matlab 2018a) в розділі Simscape була додана бібліотека Simscape Components. У розділі Power Systems ця бібліотека включає нові модифікації електродвигунів, напівпровідників та датчиків, а також розділ Control. У цьому розділі доступні блоки BLDC Control, такі як BLDC Current Controller with PWM Generation і BLDC Commutation Logic. Симуляційна модель системи позиційного електропривода на основі BLDC з використанням цих блоків представлена на рис. 5.1.



Рисунок 5.1 – Модель BLDC

Блок BLDC може моделювати синхронний двигун з постійними магнітами, який має трифазний статор з обмоткою у вигляді зірки. Цей блок пропонує чотири опції для визначення розподілу магнітного потоку в залежності від кута ротора. Два варіанти надають можливість простої параметризації, вважаючи ідеальну трапецію зворотної ЕРС. Для цієї простої параметризації ви можете задати або потокозчеплення, або індуковану ротором зворотну ЕРС. Щодо двох інших параметрів, вони надають більш точні результати за умови використання вказаних табличних даних. Для отримання ще більш точних результатів ви можете вказати або приватну похідну потокозчеплення, або вимірну постійну проти-ЕРС для певної швидкості ротора. На рис. 5.2 наведено еквівалентну електричну схему обмоток статора.

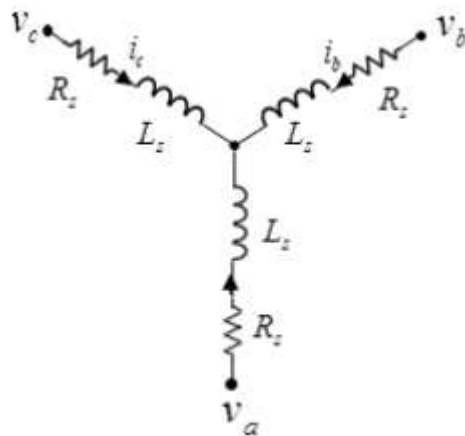


Рисунок 5.2 – Еквівалентна схема безколекторного двигуна постійного струму зі з'єднанням в зірку

На зображенні 5.3 відображено устрій двигуна із однією парою полюсів на роторі.

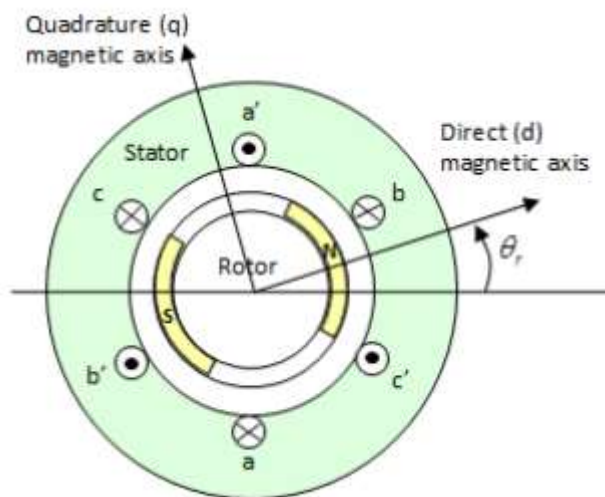


Рисунок 5.3 – Конструкцію двигуна з однією парою полюсів на роторі

Для ідентифікації осей на попередньому зображенні потоки а-фази та постійного магніту вирівняні, коли кут ротора  $\theta_r$  рівний нулю. Блок підтримує альтернативне визначення осі ротора. У цьому визначенні кут ротора визначається як кут між магнітною віссю а-фази і віссю q ротора. Завдяки наявності постійних магнітів магнітне поле ротора створює трапецієподібну швидкість зміни потоку залежно від кута ротора. На зображенні 5.4 цей процес ілюструється.



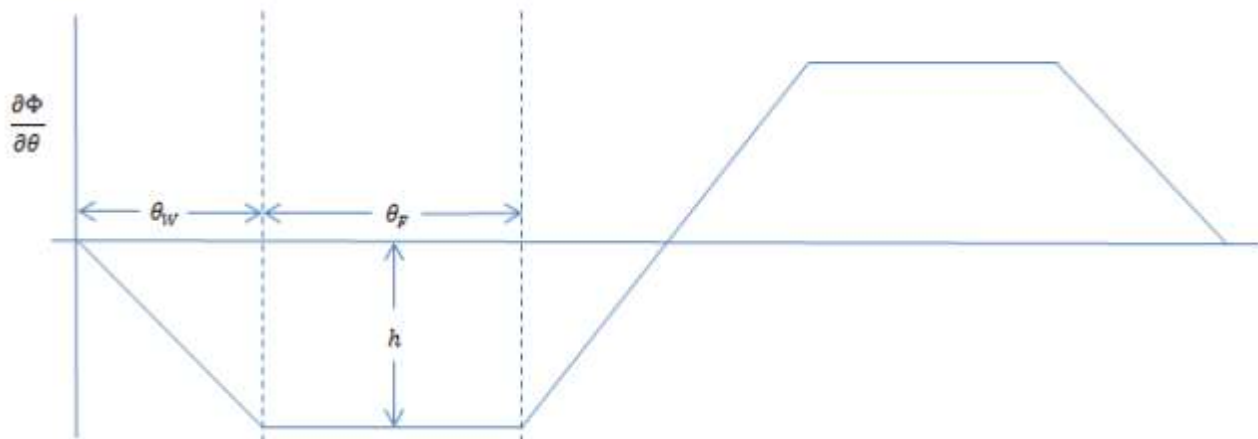


Рисунок 5.4 – Трапецієподібна швидкість зміни потоку

Зворотна електрорушійна сила (ЕРС) - це швидкість зміни потоку, яка визначається

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\Phi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\Phi}{d\theta} \omega \quad 5.1$$

де:  $\Phi$  - постійний магнітний потокозчеплення;  $\theta$  – кут ротора;  $\omega$  механічна швидкість обертання.

Висота  $h$  трапецієподібної зміни потоку визначається від пікового потоку постійного магніту.

Інтегруючи  $d\Phi/d\theta$  в діапазоні від  $0$  до  $\pi/2$ ,

$$\Phi_{max} = \frac{h}{2} (\theta_F + \theta_W) \quad 5.2$$

де:  $\Phi_{max}$  - це зв'язок потоку постійного магніту;  $h$  – швидкість зміни висоти профілю потоку;  $\theta_F$  — діапазон кутів ротора, в якому зворотна ЕРС, яку індукує потік постійного магніту в статорі, є постійною;  $\theta_W$  – діапазон кутів ротора, в якому зворотна ЕРС лінійно збільшується або зменшується, коли ротор рухається з постійною швидкістю.

Перетворюючи попереднє рівняння

$$h = 2\Phi_{max}/(\theta_F + \theta_W) \quad (5.3)$$

### 5.1 Математичний опис у природній трифазній системі координат

Відповідно до еквівалентної схеми, показаної на рисунку 5.2, і другого закону Кірхгофа, ми можемо виразити рівняння фазних напруг двигуна у наступному вигляді:

$$U_a = R * i_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a$$

$$U_b = R * i_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b$$

$$U_c = R * i_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c$$

5.4

Рівняння для лінійних напруг запишуться:

$$U_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b$$

$$U_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c$$

$$U_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a$$

5.5

де

$e_{abc}$  - ЕРС,  $i$  – струми якоря, що протікають через обмотки,  $U$  – фазні напруги,  $U_{ab}$ ,  $bc$ ,  $ca$  – лінійні напруги.

Вираз для відношення між фазними струмами двигуна при з'єднанні в зірку виглядає наступним чином:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (5.6)$$

Оскільки кожна з напруг є результатом лінійного поєднання двох інших, для повного опису системи керування достатньо використовувати два рівняння. За допомогою виразів (4.4) та (4.5) можемо переписати систему лінійних напруг у такий спрощений вигляд:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \\ U_{bc} &= R(i_a - 2i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - 2i_b) + e_b - e_c \end{aligned}$$

5.7

Відповідно до другого закону руху Ньютона, зв'язок між електромагнітним моментом ( $T_e$ ) та швидкістю обертання двигуна ( $\omega_m$ ) може бути виражений за допомогою наступної системи рівнянь:

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad 5.8$$

Де  $T_l$  – момент навантаження в Нм,  $J$  – момент інерції в кг\*м;  $B$  – коефіцієнт в'язкого тертя.

Отриманий електромагнітний момент безколекторного двигуна постійного струму можна виразити наступним чином:

$$T_a = \frac{k_t}{2} [i_a F(\theta_e) + i_b F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right)] \quad 5.9$$

У рівнянні (4.9) використовуються такі позначення:  $e_k$  і  $t_k$  - константи проти-ЕРС та електромагнітного моменту відповідно. Електричний кут  $\theta_e$  дорівнює механічному куту  $\theta_m$  двигуна, помноженого на кількість пар полюсів ( $2e_{mp}\theta_e = \theta_m$ ). Функція  $F(\theta)$  – це функція положення ротора, яка визначає трапецієподібну форму сигналу проти-ЕРС.

$$F_{\theta_e} = \begin{cases} 1, & 0 < \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi} \left( \theta_e - \frac{2\pi}{3} \right), & \frac{2\pi}{3} < \theta_e < \pi \\ -1, & \pi < \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ 1 + \frac{6}{\pi} \left( \theta_e - \frac{2\pi}{3} \right), & \frac{5\pi}{3} < \theta_e < 2\pi \end{cases}$$

5.10

## 5.2 Математична формулювання моделі двигуна в координатах dq

Припускаючи, що зворотна ЕРС статора має трапецієподібну форму, аналітична модель для безколекторного двигуна постійного струму в dq координатах наведена у вигляді:

$$\frac{d}{dt} i_d = -\frac{R}{L_d} i_d + w_r p \frac{L_d}{L_q} i_q + \frac{V_d}{L_d} \quad 5.11$$

$$\frac{d}{dt} i_q = -\frac{R}{L_q} i_q + w_r p \frac{L_d}{L_q} i_q - w_r p \frac{\lambda_m}{L_q} + \frac{V_q}{L_q} \quad 5.12$$

$$T_e = \frac{3}{2} p [\lambda_m i_q + (L_d - L_q) i_q i_d] \quad 5.13$$

$$\frac{d}{dt} w_r = \frac{1}{J} (T_e - w_r + T_L) \quad 5.14$$

Де  $V_{d,q}$  – напруги статора в системі dq;  $i_{d,q}$  – струми статора в системі dq,  $L_{d,q}$  – індуктивності статора,  $R$  – опір статора,  $T_e$  – електромагнітний момент,  $T_L$  – момент навантаження,  $p$  – число пар полюсів,  $\lambda$  – потокозчеплення постійних магнітів,  $w_r$  – швидкість ротора,  $J$  – момент інерції,  $F$  – коефіцієнт тертя.

## 6 СИМУЛЯЦІЯ СИСТЕМИ ПОЗИЦІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗКОЛЕКТОРНОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

6.1 Розробка моделі електроприводу з системою позиційного управління за використання безколекторного постійного струму.

Для аналізу системи управління кутом ротора в електричному приводі на основі безколекторного двигуна постійного струму розробимо математичну модель у програмному пакеті Simulink-MATLAB. У цьому обраному середовищі використовуватимемо блоки з бібліотеки SimScape, що спростить процес розробки моделі та враховуватиме такі ефекти, як широтно-імпульсна модуляція, перемикання ключів та інші. На рис. 6.1 показана модель для вивчення системи позиційного електроприводу на основі безколекторного двигуна постійного струму.

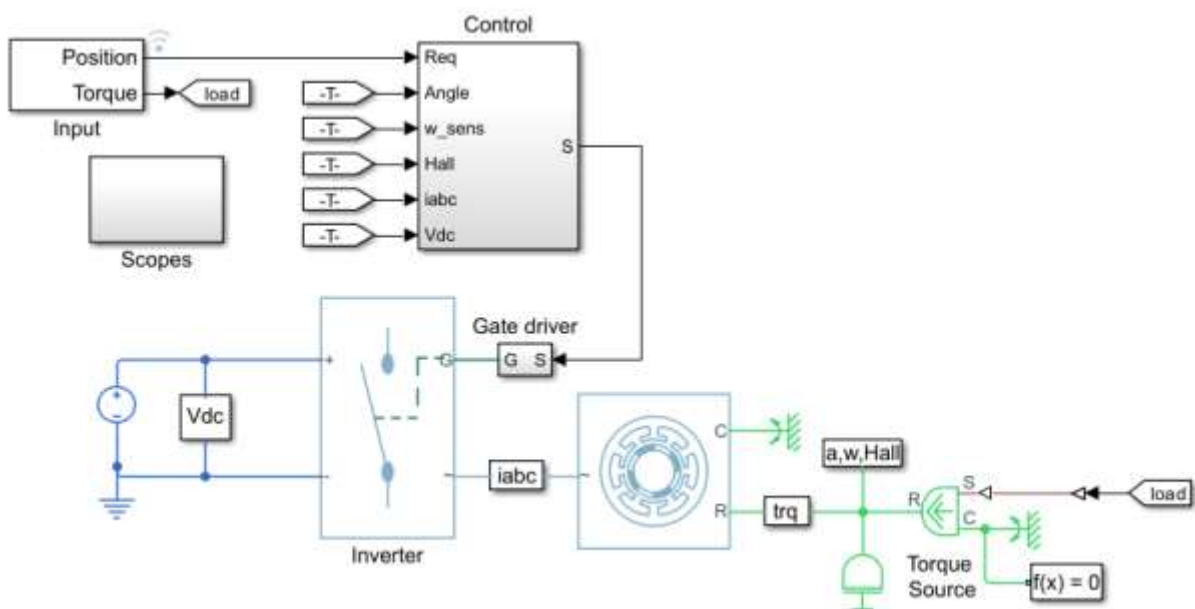


Рисунок 6.1 – Система керування безколекторним двигуном постійного струму

Модель складається як з базових блоків бібліотек Simulink, так і з блоків різних додатків системи віртуального фізичного моделювання (PhysMod, Simscape), наприклад, Power Systems, Electrical, Mechanical. Задачі на положення

(position) і момент навантаження (Torque load) генеруються блоком Input (Signal Builder з бібліотеки Simulink Sources). До підсистеми керування Control, крім сигналу задачі на положення, надходять сигнали від датчика руху (Motion Sensor), що вимірює кутове положення ( $a=Angle$ ), кутову швидкість ( $W=w\_sens$ ) і сигнал Холла (Hall), а також сигнали від датчиків струму ( $iabc$ ) і напруги ( $Vdc$ ). На основі цієї інформації блок генерує 6 сигналів керування S ключами інвертора (Invertor), який складається замістовою схемою та живиться від джерела постійної напруги. Моделі вказаних вище датчиків зображено на рис. 6.2-6.5.

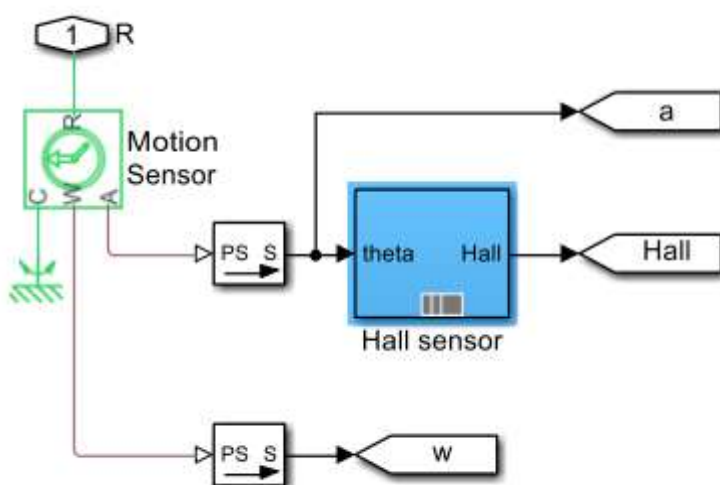


Рисунок 6.2 – Модель датчика руху

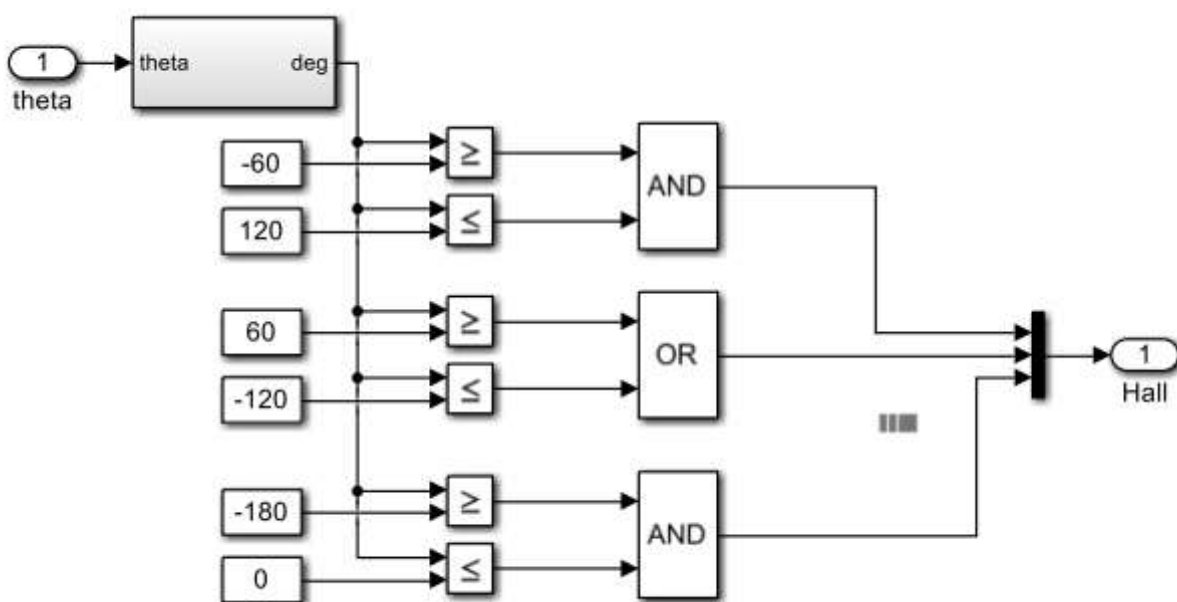


Рисунок 6.3 – Модель датчика Холла

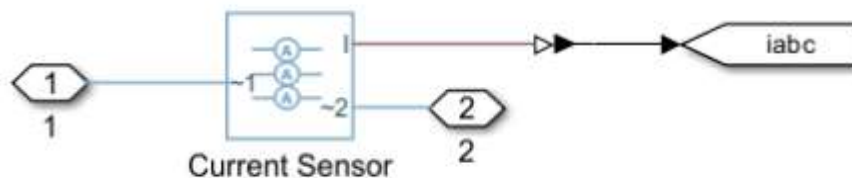


Рисунок 6.4 – Модель 3-фазного датчика струму

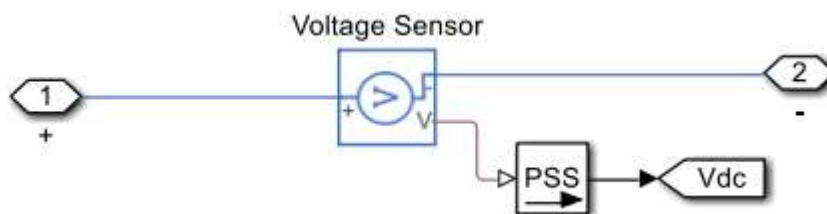


Рисунок 6.5 – Модель датчика напруги

Двигун BLDC розділено на електричну частину (блок BLDC) та механічну частину, яка під'єднана до нього через обертальний механічний порт R та датчик моменту  $trq$  (Torque Sensor), реалізований блоком Inertia з бібліотеки SimScare в розділі Foundational Library, Mechanical, Rotational Elements. Поряд з вимірним електромагнітним моментом  $Tq\_meas$  (див. модель на рис. 6.6), до блоку Inertia додається момент навантаження, отриманий з блоку Input у Simulink (S), перетвореного у Power System (PS), та поданого на вхід блоку Ideal Torque Sensor через конвертацію сигналу.

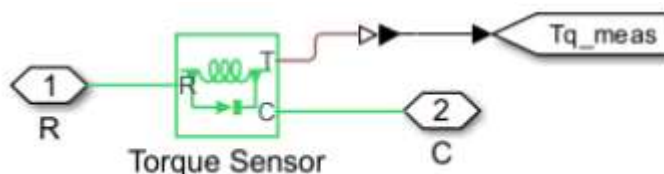


Рисунок 6.6 – Модель датчика моменту

Розгорнута схема підсистеми Control подана на рис. 6.7

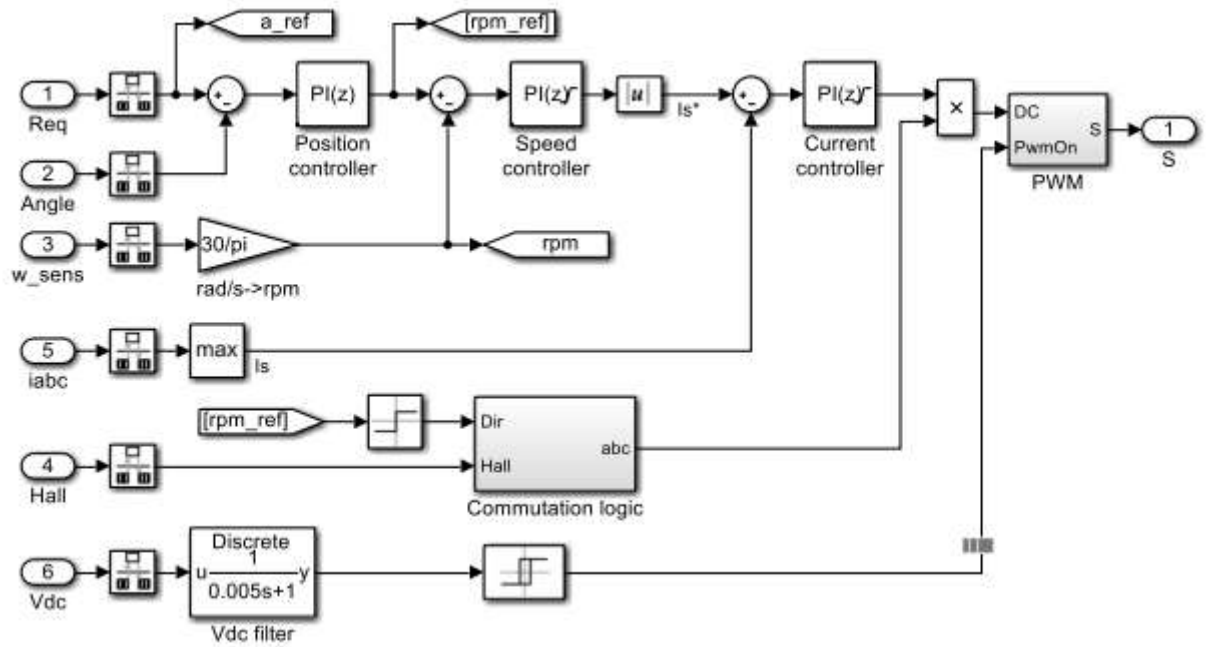


Рисунок 6.7 – Вміст підсистеми Control

Система керування спроектована з використанням концепції ієрархічного управління та складається з трьох рівнів: рівня положення, підпорядкованого йому рівня швидкості та внутрішнього рівня струму з використанням зворотного зв'язку за максимальним із фазних струмів. Всі три регулятори (Position controller, Speed controller, Current controller) представлені цифровими ПІ-регуляторами (див. рис. 6.8).

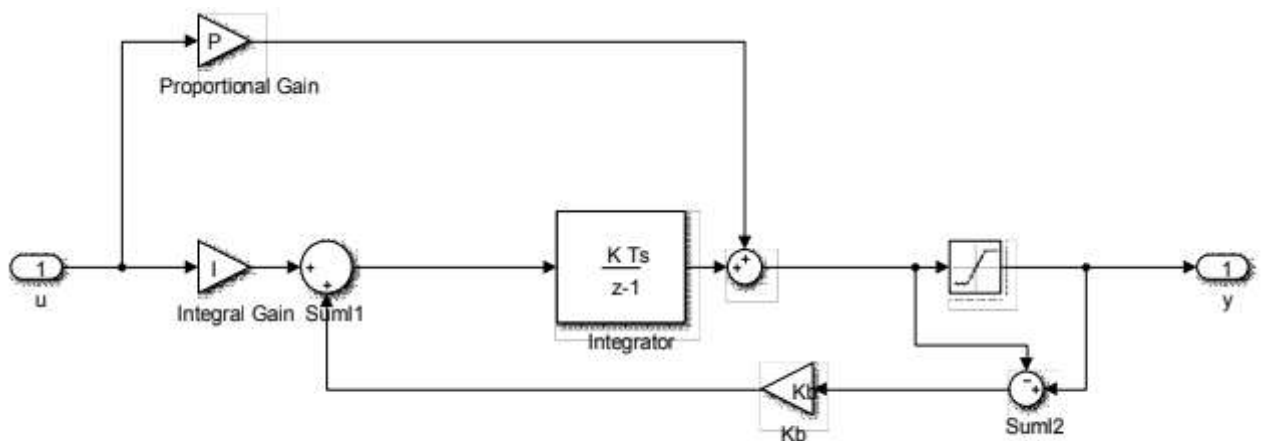


Рисунок 6.8 – Вміст блоків PI-Controller

Всі аналогові сигнали подаються в систему керування через екстраполятори нульового порядку. Напрямок обертання двигуна визначається за знаком



вихідного сигналу регулятора положення  $\text{sign}(\text{rpm\_ref})$ , який подається на блок Commutation Logic. Розгорнуту схему цього блоку можна побачити на рис. 6.9.

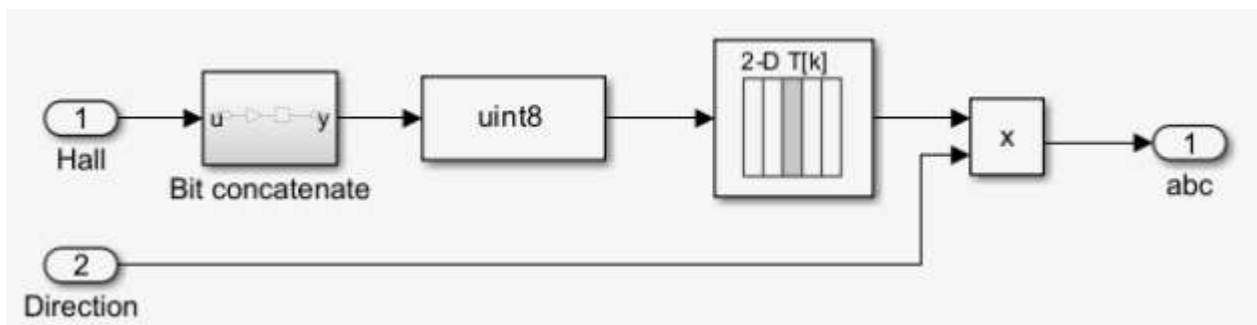


Рисунок 6.9 – Вміст блоку BLDC Commutation Logic

Блок BLDC Commutation Logic реалізує логіку комутації для безколекторних двигунів постійного струму як частину цього алгоритму керування. Логіка комутації ґрунтується на сигналах датчиків Холла. Розгорнута схема блоку PWM показана на рис. 6.10.

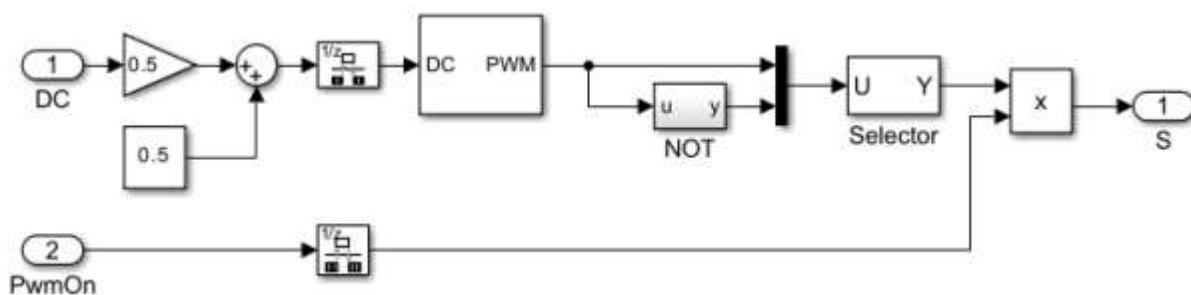


Рисунок 6.10 – Вміст блоку PWM

Блок PWM генерує прямокутні імпульси зі змінним періодом залежно від вхідного значення.

6.2 Дослідження системи позиційного керування електроприводу, заснованого на безколекторному постійному струмі, з використанням математичного моделювання.

Оскільки параметри для моделювання двигунів сервоприводу MG996R, використаних у робототехнічному проєкті для керування пальцями робо-руки,

невідомі, тому для вивчення вибирається інший двигун для демонстрації. У моделюванні розглядається об'єкт керування як "чорна скринька", що часто зустрічається на практиці. Для двигунів невеликої потужності експериментальне визначення параметрів є складною задачею і вимагає високоякісного вимірювального обладнання. Таким чином, регулятори налаштовуються так, щоб забезпечити необхідну якість перехідних процесів та точність відтворення вхідних сигналів. У випадках, коли кожен з регуляторів має лише два змінюваних параметри (коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових), це завдання є реалізованим. Крім того, враховуючи дуже малі значення електромагнітної сталі часу статора, налаштування проводиться, розпочинаючи з контуру струму. На рисунках 6.11 та 6.12 представлені реакції контуру струму на стрибок вхідного сигналу при двох значеннях коефіцієнта інтегральної складової ( $K_{ii}$ ), відмінних одне від одного в 16 разів.

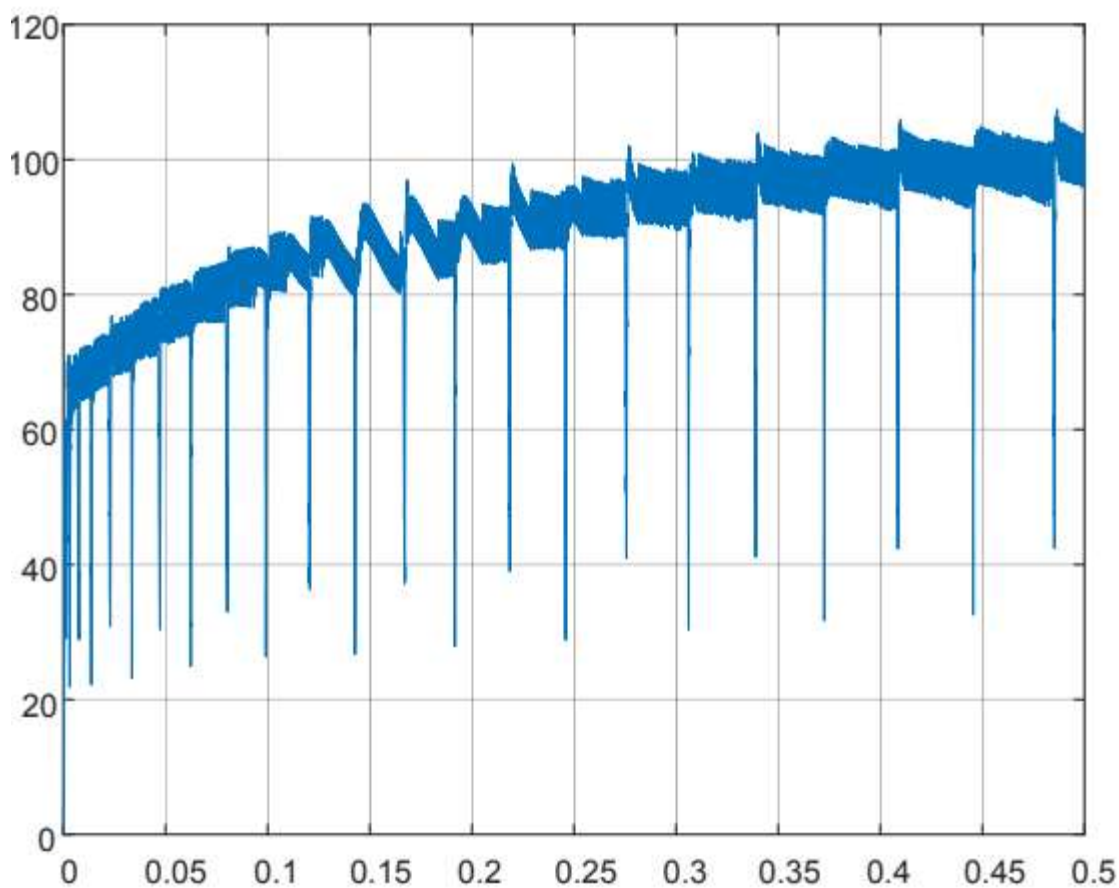


Рисунок 6.11 – Реакція контуру струму на стрибок завдання при  $K_{ii} = 0.08$

Із порівняння представлених графіків видно, що в першому випадку (рис. 6.11) налаштування контуру струму є незадовільним, оскільки струм зростає дуже повільно. У такому випадку не можна очікувати задовільної якості роботи зовнішніх контурів. У другому випадку (рис. 6.12) завдання відпрацьовується приблизно за 0,02 секунди з невеликим перерегулюванням (приблизно 1%), що відповідає вимогам до швидкодії внутрішнього контуру.

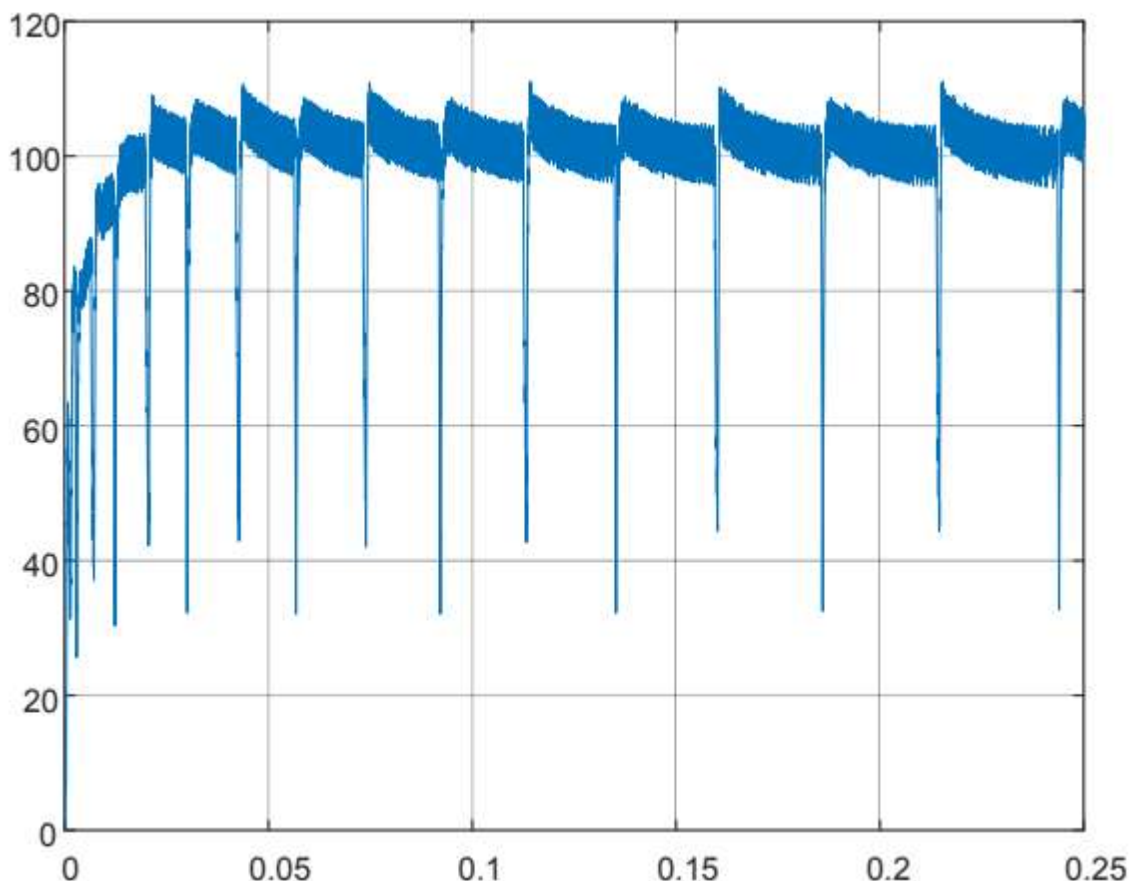


Рисунок 6.12 – Реакція контуру струму на стрибок завдання при  $K_{ii}=1.28$

Аналогічно можна налаштувати і регулятор швидкості, проте основним завданням є налаштування зовнішнього контуру. Продемо систему керування БДПС (рис. 6.1) для стрибкоподібного, лінійного та S-подібного сигналів задання положення. У цьому експерименті ми будемо спостерігати не тільки за кутовим переміщенням, але й за кутовою швидкістю, електромагнітним моментом та струмами статора. Відповідні графіки перехідних процесів показані на рис. 6.13-6.15.

З аналізу представлених графіків випливає, що при:

1. стрибкоподібній зміні завдання на переміщення відбувається з великим перерегулюванням (близько 25%), що для більшості позиційних електроприводів може бути неприпустимим.

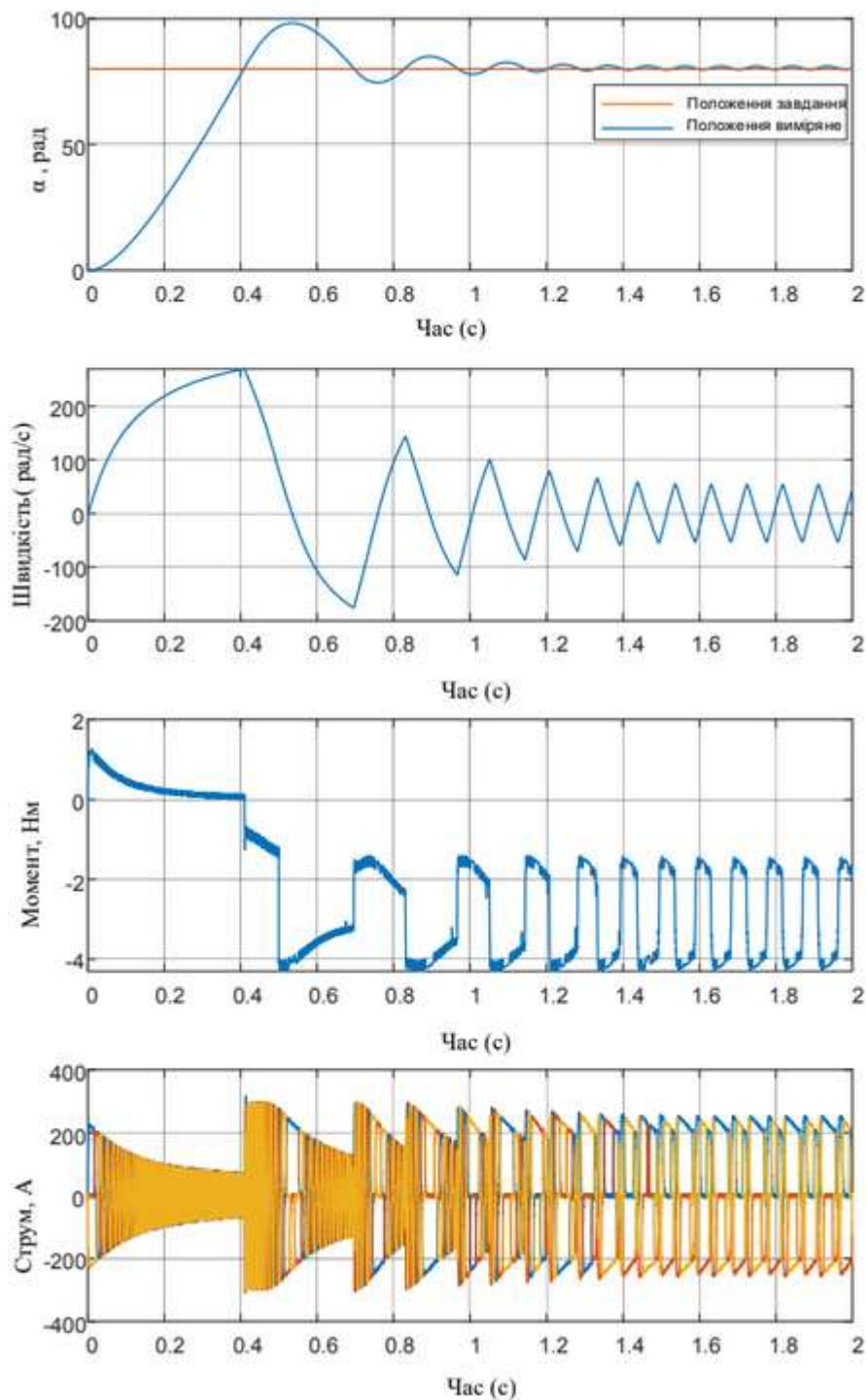


Рисунок 6.13 – Перехідні процеси в системі позиційного електропривода з стрибкоподібним завданням на положення

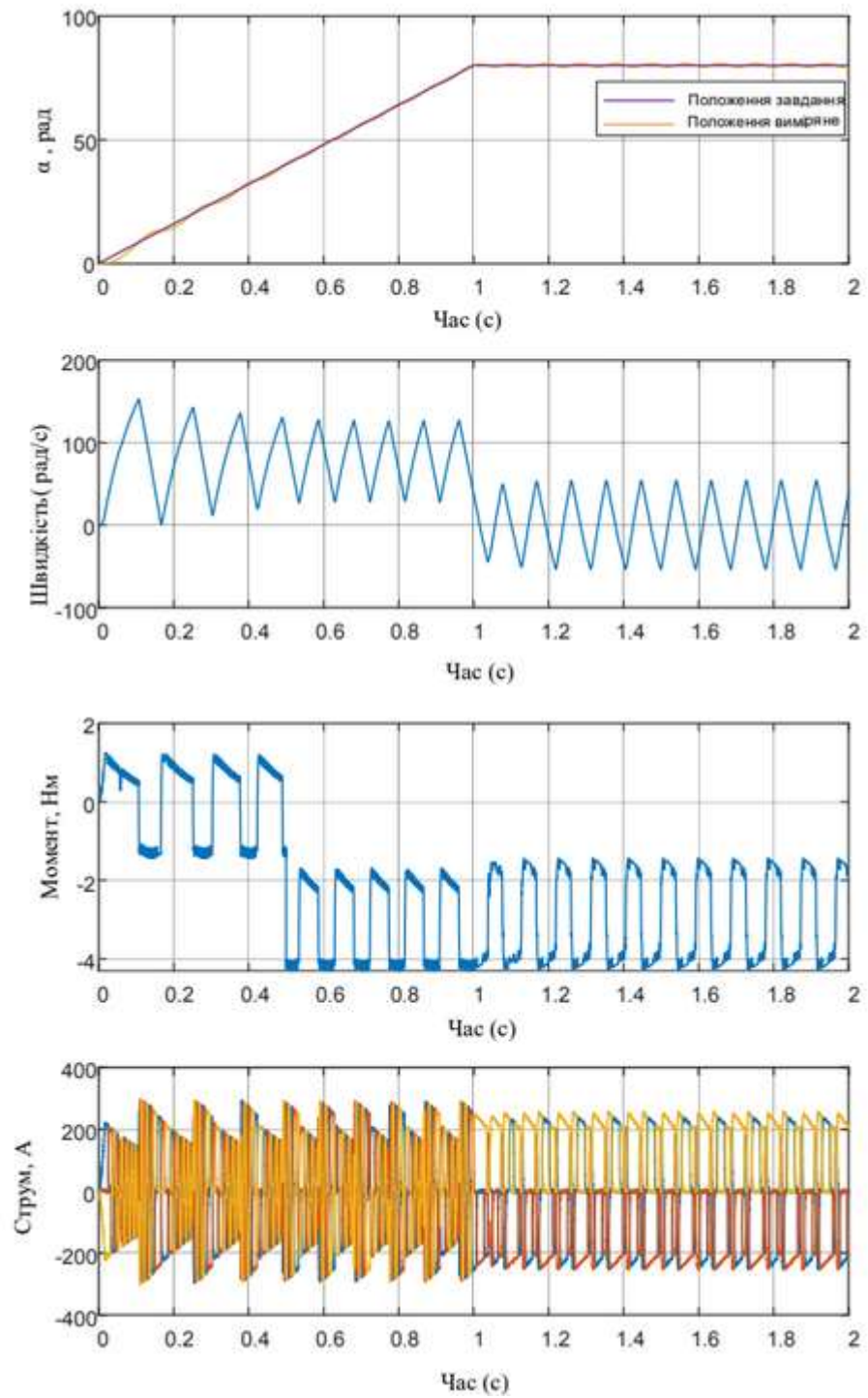


Рисунок 6.14 – Перехідні процеси в системі позиційного електропривода з лінійним завданням на положенням

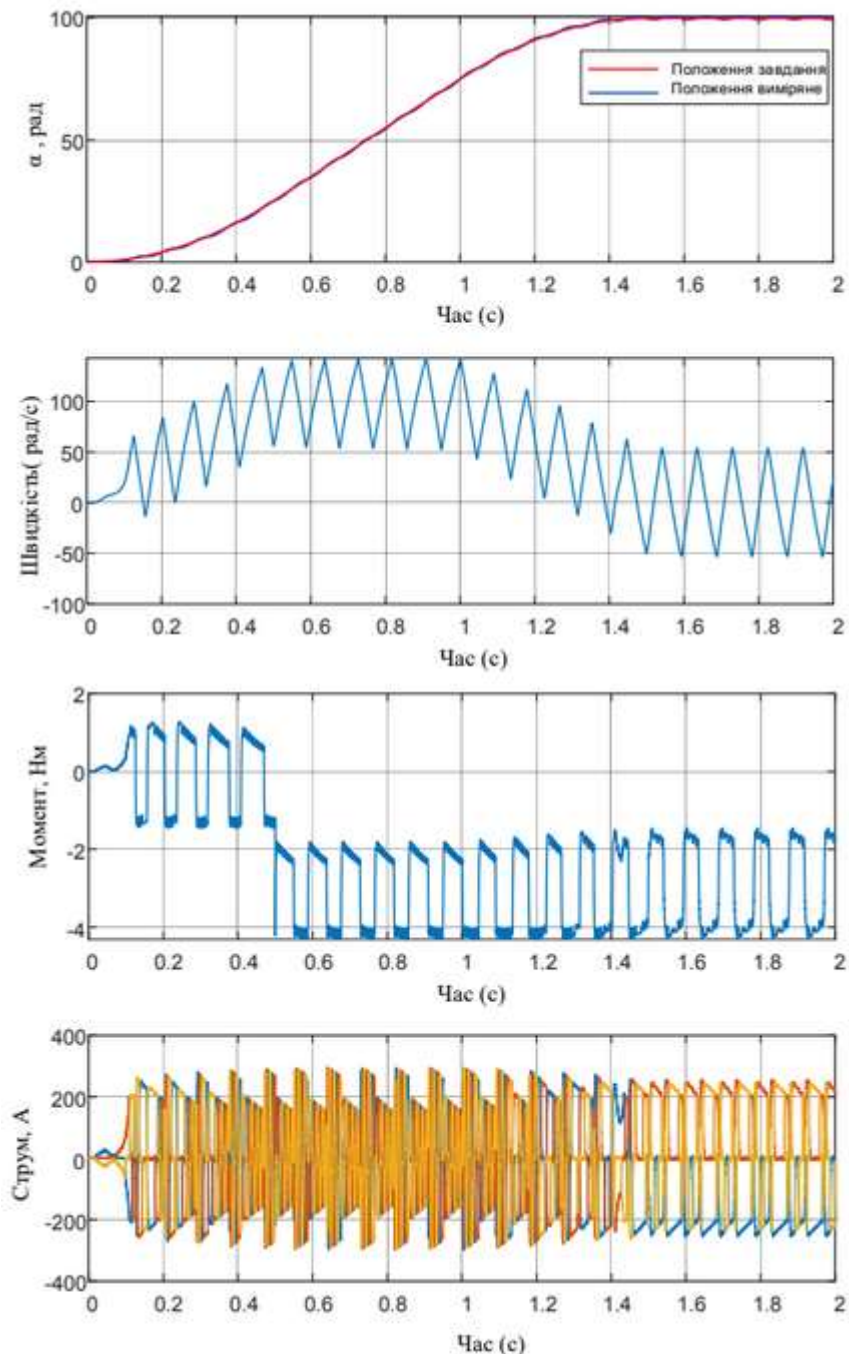


Рисунок 6.15 – Перехідні процеси в системі позиційного електропривода з S- подібний завданням на положенням

2. При лінійному завданні спостерігаються невеликі коливання регульованої координати відносно сигналу завдання, а при S-подібному завданні амплітуда цих коливань стає майже непомітною.

3. Регулювання моменту має характер трапецієподібних імпульсів, а регулювання швидкості відбувається з трикутними коливаннями навколо певних середніх значень. Така поведінка сигналів обумовлена принципом роботи BLDC.

4. У кривій електромагнітного моменту спостерігаються високочастотні коливання, зумовлені широтно-імпульсною модуляцією.

Отже, при реалізації досліджуваної системи для приводу пальців роботизованої руки, так само як і для багатьох інших позиційних механізмів, рекомендується віддавати перевагу S-подібному завданню на переміщення, при якому обмежується не тільки швидкість і прискорення, але й ривок. При такому регулюванні людина не відчуває дискомфорту, і збільшується термін служби механічних деталей.

## 7 РЕАЛІЗАЦІЯ РОБОЧОЇ УСТАНОВКИ ТА ЇЇ КОМПОНЕНТІВ У ПРАКТИЦІ

### 7.1 Установа робочого обладнання.

"Для складання конструкції руки ми використовуємо надруковані деталі. Процес збирання передбачає використання універсальних шурупів (4.0x16 мм), металевого тросу діаметром 2 мм, епоксидного клею та плетеного шнура Kalipso (0.4 мм). Спочатку складаємо пальці руки з передбаченою підготовкою та очищенням деталей. Потім, де необхідно, деталі додатково обробляються, а перед приєднанням пальців до долоні проводиться прокладання шнура. Процес прокладання волосіні починається з кінчиків пальців, проходить через верхні отвори, далі через верхню частину долоні, долинує до зап'ястя через спеціальні отвори в передпліччях, де будуть розташовані сервоприводи. Потім волосінь змінює напрямок, проходить у зворотному напрямку через нижні отвори до кінчика пальця, де її закріплюють. Цей процес повторюється для всіх пальців. Після прокладання волосінь розпочинається кріплення окремих частин моделі, і після завершення складання необхідно очистити залишки клею та інші нерівності. Зібрана конструкція представлена на рисунку 7.1."



Рисунок 7.1 – Зібрана конструкції кисті руки



"Після завершення складання конструкції кісток руки, переходимо до з'єднання зап'ястя та передпліччя. Перш ніж об'єднувати всі частини, необхідно очистити та обезжирити місця з'єднань. Після цього з'єднуємо половинки передпліччя за допомогою епоксидного клею та фіксуємо струбцинами, для повного зліплення якого потрібно 24 години. Закріплюємо рамку для сервоприводів в передпліччя за допомогою шурупів, а коли рамка зафіксована, встановлюємо сервоприводи Tower Pro MG996R в неї. Потім переходимо до збору зап'ястя, що складається з трьох частин. Зачищаємо та склеюємо з'єднання тих частин, які знаходяться ближче до передпліччя. Після цього продовжуємо збірку передпліччя, проводячи шнури від кісток через отвори в зап'ясті. Після проведення шнурів фіксуємо деталі зап'ястя за допомогою шурупів та з'єднуємо його з кісткою руки, утворюючи шарнір. Для кріплення сервоприводів використовуються надруковані елементи, які зафіксовані на шурупах. Проводимо шнури до сервоприводів, натягуємо та фіксуємо їх на кріпленнях. Збірка завершена, отримана конструкція зображена на рисунку 7.2."



Рисунок 7.2 – Зібрана конструкції передпліччя руки

Розроблена конструкція, зображена на рис. 7.2, призначена для ефективного захоплення та утримання великого вантажу за допомогою натягнутої нитки. Цей пристрій здатний зафіксувати предмет у своєму захваті, утримуючи його та запобігаючи випадінню. Завдяки низькому споживанню електроенергії, пристрій може працювати достатньо довго на акумуляторах. Також можливо покращити

пристрій, встановивши потужніші сервоприводи для виконання більш важких та точних завдань.

## 7.2 Кінематична структура модульного протезу кисті.

Для досягнення правильного виконання різних захоплень важливо належним чином задавати кінематику пальців та кисті. Це вимагає визначення траєкторії руху для кожної фаланги пальця кисті. У застосованій схемі кожен палець має три рухливі деталі, що рухаються послідовно, починаючи з верхньої фаланги, де закріплений електропривід для виконання руху. Передача зусилля від вала двигуна до пальця здійснюється за допомогою натягу нитки. На рисунку 7.3 наведено приклад руху пальця при натягу нитки

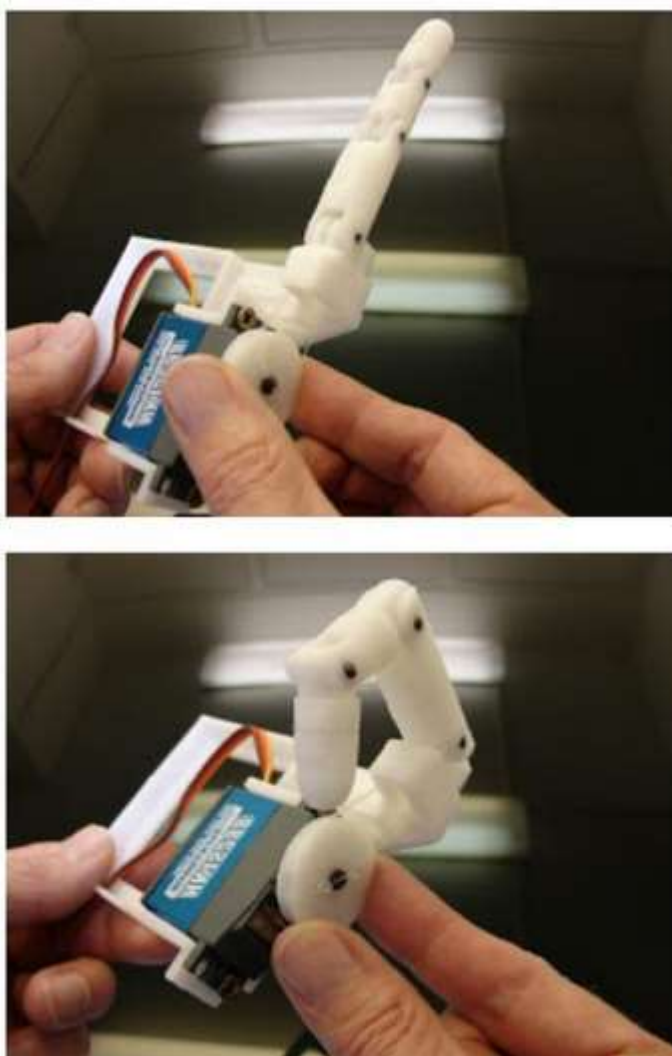


Рисунок 7.3 – Рух пальця при натягу нитки

### 7.3 Характеристика вимірювальних засобів.

Для створення системи управління необхідно використовувати датчики та забезпечити їх живлення на платі управління. Для вимірювання кута вигину пальця був розроблений саморобний датчик вигину (рис. 7.4). Цей датчик кріпиться до кожного пальця на кисті так, що при згинанні пальця він також згинається, надаючи відповідний сигнал.



Рисунок 7.4 –Зовнішній вигляд датчика вигину

Робочий принцип цих датчиків базується на використанні фоторезисторів та світлодіодів. Світло від діодів направляється на фоторезистори через силіконові трубки. У прямому положенні трубок світловий потік найбільший, а при їх згинанні потік світла зменшується, збільшуючи опір на фоторезисторі (рис. 7.2). Для створення такого датчика вам знадобляться:

- Фоторезистор – 5 штук;
- Світлодіод – 5 штук;
- Силіконова трубка – 1 метр, діаметром 5 мм;
- Чорна термоусаджувальна трубка – 1 метр, діаметром 7 мм;
- Струмобмежувальний резистор (220 Ом) – 5 штук;
- Підтягуючий резистор (10 кОм) – 5 штук;
- Ізоляційна стрічка – 1 шт.

Складання такого датчика відносно складне. Спочатку відріжте шматок силіконової трубки, довжина якого відповідає розміру пальця. Потім вставте фоторезистор з одного боку трубки, а світлодіод - з іншого. Після цього трубку з вже вставленими елементами помістіть в термоусаджувальну трубку і ретельно нагрійте, щоб термоусадка щільно прилягала до трубки. Цю роботу повторюйте 5

разів. Далі припаяйте струмобмежувальний резистор до світлодіода і підтягуючий резистор до фоторезистора. З використанням описаного вище принципу роботи було створено п'ять датчиків вигину, які можна закріпити на робочій рукавичці. В результаті отримано щось схоже на сенсорну рукавичку, зовнішній вигляд якої представлений на рисунку 7.5. З використанням цих датчиків можна керувати проектом.



Рисунок 7.5 – Сенсорна рукавичка

Цей пристрій має задовільну лінійність для саморобного датчика, зробленого в робочих умовах, і підходить для використання в цьому проекті. Однак існують певні недоліки, які можна врахувати або ігнорувати під час програмної обробки проекту.

При тривалому використанні може виникнути проблема з лінійністю датчика у всьому діапазоні через механічний знос. Деформація трубки, по якій проходить світло, може виникнути внаслідок регулярного впливу, що може вплинути на геометрію внутрішньої порожнини трубки та світловий потік.

В результаті таких механічних впливів сигнал датчика може містити "шум" та непереборність. Щоб вирішити цю проблему, була виконана заміна силіконової трубки більш товстою стінкою, що дозволило уникнути постійної деформації та забезпечити більш стабільну роботу.

Отримана сенсорна рукавичка включає п'ять саморобних датчиків вигину, по одному на кожен палець, закріплених на рукавичці. Це дозволяє операторові

керувати пальцями роботизованої руки, надіваючи рукавичку на руку та згинаючи пальці, щоб формувати завдання для об'єкта управління. Сигнали з датчиків подаються на аналогові контакти плати Arduino UNO.

#### 7.4 Електрична схема

На рисунку 7.6 наведено електричну схему робочої установки, на якій видно плату із підключеними до неї робочими компонентами. До цих компонентів входять п'ять датчиків вигину та п'ять сервоприводів. Живлення сервоприводів забезпечується віддільним джерелом напруги на 5В, розташованим ззовні. Плату Arduino Uno живлять через USB-порт або роз'єм PWR. Живлення для датчиків вигину подається від плати.

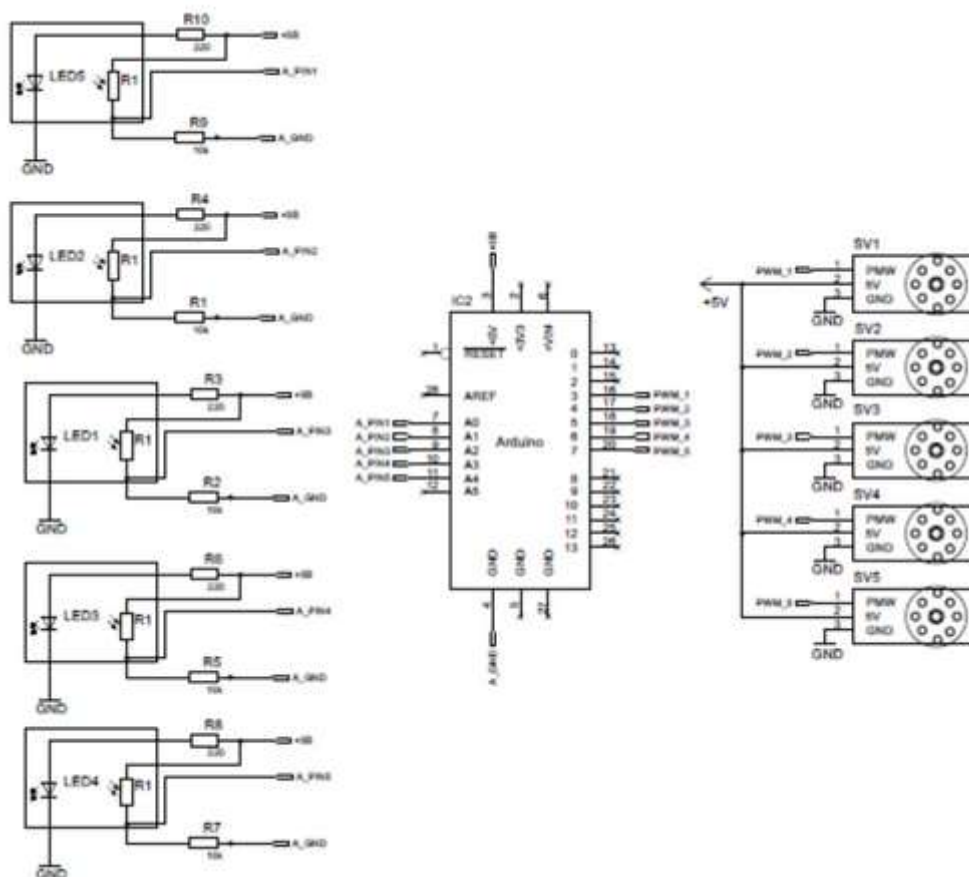


Рисунок 7.6 – Електрична схема робочої установки

## 7.5 Програма

Для розробки програм для Arduino використовується спрощена версія мови C++ із функціями. Схоже на інші мови програмування типу C, у кодї дотримуються певних правил:

- Після кожної інструкції потрібно поставити крапку з комою (;).
- Перед оголошенням функції слід вказати тип даних, який функція повертає, або void, якщо функція не повертає значення.
- Тип даних також необхідно вказати перед оголошенням змінної.
- Коментарі можуть бути як рядковими (//) так і блоковими (/\* \*/).

Більше інформації про типи даних, функції, змінні, оператори та мовні конструкції можна знайти на сторінці з програмування Arduino. Усі програми для Arduino повинні включати принаймні дві функції: setup() та loop().

Для написання програм для контролера Arduino необхідно встановити середовище програмування. Найпростіший спосіб — встановити безкоштовне Arduino IDE, яке можна завантажити з офіційного сайту.

Після встановлення IDE важливо перевірити, що вибрана правильна плата. У меню "Інструменти" -> "Плата" слід обрати відповідну плату (Arduino/Genuino Uno). Після цього параметри проекту автоматично адаптуються до обраної плати, і скетч буде скомпільовано у формат, який підтримує обрану плату.

Сам скетч зазвичай представляє собою нескінчений цикл, в якому регулярно опитуються піни з підключеними датчиками, і за допомогою спеціальних команд формується керуючий вплив на зовнішні пристрої. Програміст має можливість підключити готові бібліотеки, як вбудовані в IDE, так і доступні на різноманітних сайтах та форумах.

Написаний і скомпільований код завантажується на Arduino UNO через USB-з'єднання (UART-Serial) за допомогою bootloader, що вже встановлений на контролері.

Код програми:

```
#include <Servo.h> // Підключення бібліотеки для роботи із сервоприводом
```

```

int PhotosensorPin1 = A1; // Оголошення змінної та присвоєння їй значення.
int PhotosensorPin2 = A2;
int PhotosensorPin3 = A3;
int PhotosensorPin4 = A4;
int PhotosensorPin5 = A5;
Servo servo1; // Оголошуємо змінну servo1 типу Servo.
Servo servo2;
Servo servo3;
Servo servo4;
Servo servo5;
void setup() {
servo1.attach(3); // Прив'язуємо привод до порту 3.
servo2.attach(4);
servo3.attach(5);
servo4.attach(6);
servo5.attach(7);
}
void loop() {
int val1 = analogRead(PhotosensorPin1); // Зчитування значення з
фоторезистора
val1 = map(val1, 450, 0, 180, 0); // Переведення діапазон числа val [min max]
в новий
діапазон [min max]
//[450 0] – діапазон чутливості фоторезистора
//[0 180] – діапазон обертання привода
servo5.write(val1); // Обертання валу на кут val1
delay(2); // Затримка 2 мс.
int val2 = analogRead(PhotosensorPin2); // Зчитування значення з
фоторезистора
val2 = map(val2, 200, 0, 180, 0);
servo4.write(val2);

```

```
    delay(2);
    int val3 = analogRead(PhotosensorPin3); // Зчитування значення з
фоторезистора
    val3 = map(val3, 550, 0, 180, 0);
    servo3.write(val3);
    delay(2);
    int val4 = analogRead(PhotosensorPin4); // Зчитування значення з
фоторезистора
    val4 = map(val4, 200, 0, 180, 0);
    servo2.write(val4);
    delay(2);
    int val5 = analogRead(PhotosensorPin5); // Зчитування значення з
фоторезистора
    val5 = map(val5, 650, 170, 180, 0);
    servo1.write(val5);
    delay(2);
}
```



## 8 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованої руки» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

### 8.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованої руки» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (повному або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	50	55	53

Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>		52,7		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 4.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	62	60	63
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
<b>Середнє значення балів експертів</b>	61,7		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [27]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (4.1)$$

де  $k_{нов}$ ,  $k_{теор}$  - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи,  $k_{нов} = 52,7$ ,  $k_{теор} = 61,7$  балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{нау} = 0,6 \cdot k_{нов} + 0,4 \cdot k_{теор} = 0,6 \cdot 52,7 + 0,4 \cdot 61,67 = 56,27 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника  $E_{нау}$  проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованої руки», даний рівень становить 56,27 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

## 8.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованої руки», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

### 8.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

#### Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [27]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де  $k$  – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

$M_{ni}$  – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

$t_i$  – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці,  $T_p=21$  дні.

$$Z_o = 15720,00 \cdot 28 / 21 = 20960,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Науковий керівник дослідної роботи	15720,00	748,57	28	20960,00

Інженер-дослідник біомедичної апаратури	14880,00	708,57	15	10628,57
Науковий співробітник	14920,00	710,48	28	19893,33
Всього				51481,90

### Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованої руки» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

де  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

$t_i$  – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.4)$$

де  $M_M$  – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo  $M_M=6700,00$  грн;

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [27];

$K_c$  – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 21$  дн;

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

$$C_I = 6700,00 \cdot 1,10 \cdot 1,35 / (21 \cdot 8) = 59,22 \text{ грн.}$$

$$З_{pl} = 59,22 \cdot 5,20 = 307,96 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Підготовка робочого місця інженера-дослідника БМА	5,20	2	1,10	59,22	307,96
Інсталяція програмного забезпечення математичного моделювання	4,25	3	1,35	72,68	308,90
Формування (введення) бази даних результатів дослідження моделі	12,00	3	1,35	72,68	872,20
Формування програмних блоків	7,20	4	1,50	80,76	581,46
Компіляція програмних блоків керування роботизованою рукою	11,50	3	1,35	72,68	835,85
Всього					2906,38



Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де  $H_{\text{дод}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{дод}} = (51481,90 + 2906,38) \cdot 10 / 100\% = 5438,83 \text{ грн.}$$

### 8.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (4.6)$$

де  $H_{\text{зн}}$  – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (51481,90 + 2906,38 + 5438,83) \cdot 22 / 100\% = 13161,96 \text{ грн.}$$

### 8.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованої руки».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і

досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали ( $M$ ), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (4.7)$$

де  $H_j$  – норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, кг;

$n$  – кількість видів матеріалів;

$C_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, грн/кг;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ );

$B_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, кг;

$C_{ej}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3,0 \cdot 216,00 \cdot 1,04 - 0 \cdot 0 = 673,92 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір Офісний А4 500	216,00	3,0	0	0	673,92
Папір для записів А4 250	106,00	3,0	0	0	330,72
Органайзер офісний	199,00	4,0	0	0	827,84
Канцелярське приладдя	175,00	3,0	0	0	546,00

Картридж для принтера	985,00	1,0	0	0	1024,40
Диск оптичний CD-R	26,00	5,0	0	0	135,20
Flesh-пам'ять 64 GB	189,00	2,0	0	0	393,12
Всього					3931,20

#### 8.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_6$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованої руки» відсутні.

#### 8.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k \Pi_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (4.8)$$

де  $\Pi_i$  – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.}i}$  – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ( $K_i = 1, 10 \dots 1, 12$ );

$k$  – кількість найменувань устаткування.

$$B_{спец} = 34500,00 \cdot 1 \cdot 1,04 = 35880,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.7 – Витрати на придбання спекустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Професійний 3D принтер Qidi Tech X-Plus II друк з нейлону/вуглецевого волокна	1	34500,00	35880,00
Всього			35880,00

### 8.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{прог} = \sum_{i=1}^k C_{инрг} \cdot C_{прог.i} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де  $C_{инрг}$  – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{прог.i}$  – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ( $K_i = 1,10 \dots 1,12$ );

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{прог} = 9830,00 \cdot 1 \cdot 1,01 = 9928,30 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Математичне середовище розробки 3D моделей ANSYS	1	9830,00	9928,30
Всього			9928,30

### 8.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_г} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.10)$$

де  $Ц_б$  – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_г$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (6510,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 361,67 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.9 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
ОС Windows	6510,00	3	2	361,67
Прикладний пакет Microsoft Office	6710,00	3	2	372,78
Прикладне програмне забезпечення проектування 3D систем	7890,00	3	2	438,33
Прикладне програмне забезпечення моделювання 3D	8120,00	3	2	451,11
Приміщення лабораторії досліджень	423000,00	20	2	3525,00
Робоче місце інженера-дослідника БМА	8410,00	7	2	200,24
Принтер Epson EX1200	8500,00	5	2	283,33
ЕОМ для формування та дослідження моделей (КОМП'ЮТЕР i7 IntelWork (I5M16G1650.A5257))	47580,00	3	2	2643,33
<b>Всього</b>				<b>8275,79</b>

## 8.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію ( $B_e$ ) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot U_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.11)$$

де  $W_{yi}$  – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo  $C_e = 7,50$  грн;

$K_{vni}$  – коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{vni} < 1$ ;

$\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

$$B_e = 0,35 \cdot 25,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 65,63 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.10 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Професійний 3D принтер Qidi Tech X-Plus II друк з нейлону/вуглецевого волокна	0,35	25,0	65,63
Робоче місце інженера-дослідника БМА	0,09	220,0	148,50
Принтер Epson EX1200	0,25	4,3	8,06
ЕОМ для формування та дослідження 3D моделей (КОМП'ЮТЕР i7 IntelWork (I5M16G1650.A5257)	0,42	220,0	693,00
Всього			915,19

### 8.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованої руки» належать

витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (4.12)$$

де  $H_{cv}$  – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo  $H_{cv} = 20\%$ .

$$B_{cv} = (51481,90 + 2906,38) \cdot 20 / 100\% = 10877,66 \text{ грн.}$$

4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (4.13)$$

де  $H_{cn}$  – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo  $H_{cn} = 35\%$ .

$$B_{cn} = (51481,90 + 2906,38) \cdot 35 / 100\% = 19035,90 \text{ грн.}$$



### 8.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (4.14)$$

де  $H_{ie}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{ie} = 50\%$ .

$$I_e = (51481,90 + 2906,38) \cdot 50 / 100\% = 27194,14 \text{ грн.}$$

### 8.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo  $H_{нзв} = 105\%$ .

$$B_{нзв} = (51481,90 + 2906,38) \cdot 105 / 100\% = 57107,70 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованої руки» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{дод} + Z_n + M + K_{\epsilon} + B_{спец} + B_{прг} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_{\epsilon} + B_{нзв}. \quad (4.16)$$

$$B_{заг} = 51481,90 + 2906,38 + 5438,83 + 13161,96 + 3931,20 + 3263,40 + 35880,00 + 9928,30 + 8275,79 + 915,19 + 10877,66 + 19035,90 + 27194,14 + 57107,70 = 249398,35 \text{ грн.}$$

Загальні витрати  $ZB$  на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.17)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta = 0,9$ .

$$ZB = 249398,35 / 0,9 = 277109,28 \text{ грн.}$$

8.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованої руки» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник  $K_p$  рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.18)$$

де  $I$  – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo  $I = 4$ ;

$n$  – коефіцієнт використання результатів роботи;  $n = 0$ , коли результати роботи не будуть використовуватись;  $n = 1$ , коли результати роботи будуть використовуватись частково;  $n = 2$ , коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках;  $n = 3$ , коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo  $n = 2$ ;

$T_C$  – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo  $T_C = 3$ ;

$R$  – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то  $R = 4$ ; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то  $R = 3$ ; якщо нижче відомих результатів, то  $R = 1$ . Прийmemo  $R = 3$ ;

$B$  – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo  $B = 277109,28$  грн;

$t$  – час проведення дослідження. Прийmemo  $t = 0,17$  років, (2 міс.).

Визначення показників  $I$ ,  $n$ ,  $T_C$ ,  $R$ ,  $B$ ,  $t$  здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [27].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = \frac{4^2 \cdot 3 \cdot 3}{277,1 \cdot 0,17} = 3,12.$$

Якщо  $K_p > 1$ , то науково-дослідну роботу на тему «Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованої руки» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованої руки» складають 277109,28 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування роботизованої руки» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи  $K_p > 1$ , що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

## 9 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Важливість створення системи управління охороною праці встановлюється міжнародними актами і договорами. Охорона праці розглядається як необхідна гарантія забезпечення трудових прав працівників у сфері охорони праці. «Конвенція № 155 МОП про безпеку та гігієну праці та виробниче середовище» визначає систему організації охорони праці на національному та виробничому рівні. На роботодавців покладається обов'язок надавати робочі місця, механізми та обладнання, організовувати виробничі процеси, які відповідають встановленим нормативам і не загрожують здоров'ю працюючих, вживати заходів щодо створення відповідних служб, на які покладаються комплексні функції управління охороною праці; співпрацювати з представниками працівників шляхом надання необхідної інформації; попереджати виникнення виробничого травматизму та проводити розслідування нещасних випадків тощо.

На працівника під час дослідження та розробки 3Д моделі та системи керування роботизованої руки впливають такі небезпечні та шкідливі фактори, у відповідності з згідно Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»:

1) фізичні: підвищена та понижена температура повітря робочої зони; підвищена та понижена рухливість повітря робочої зони; підвищена запиленість повітря робочої зони; недостатня освітленість робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена та понижена вологість повітря; пряма або відображена блискість; розташування робочого місця на значній висоті від поверхні землі; гострі краї, шорсткість на поверхнях заготовок, інструментів та обладнання;

2) психофізіологічні: фізичні перевантаження (динамічні); нервово – психічні перевантаження (монотонність праці, емоційні перевантаження, перенапруга аналізаторів).

Визначаємо технічні рішення з безпечного виконання роботи у відповідності до окреслених факторів.

## 9.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи

### 9.1.1. Обладнання приміщення та робочого місця

Робоче місце – первинна і основна ланка виробництва, раціональна його організація має найважливіше значення у всьому комплексі питань наукової організації праці. Саме на робочому місці відбувається поєднання елементів виробничого процесу - засобів праці, предметів праці та самого праці. На робочому місці досягається головна мета праці - якісне, економічне і своєчасне виготовлення продукції або виконання встановленого обсягу роботи.

Організація обслуговування робочого місця означає його забезпечення засобами, предметами праці і послугами, необхідними для здійснення трудового процесу. Основна мета організації робочого місця є досягнення високоякісного й економічно ефективного виконання виробничого завдання у встановлений термін на основі повного використання устаткування, робочого часу, застосування передових методів праці з найменшими фізичними зусиллями, створення безпечних і сприятливих умов ведення робіт. Залежно від специфіки виробництва на організацію робочих місць впливають і інші фактори: співвідношення елементів розумової і фізичної роботи, ступінь її відповідальності. При проектуванні робочих місць повинні бути також враховані освітленість, температура, вологість, тиск, шум, вібрація, пиловиділення і інші санітарно-гігієнічні вимоги до організації робочих місць.

Робоче місце розробника 3Д моделі та системи керування роботизованої руки, який виконує завдання за допомогою комп'ютера та відповідного програмного забезпечення, відповідно до нормативних документів має відповідати таким вимогам:

– антропометричні вимоги – робоче місце повинно бути зручним і комфортним для працівника з урахуванням його антропометричних даних, таких як зріст, довжина рук, ширина плечей тощо;

– фізичні вимоги – робоче місце повинно забезпечувати оптимальні умови для роботи з екранними пристроями, такі як правильне освітлення, достатня відстань від екрану до очей, зручне положення рук і ніг тощо.

– психологічні вимоги – робоче місце повинно сприяти зниженню стомлюваності і стресу працівника, такі як наявність достатньої кількості вільного простору, можливість відпочинку тощо.

Організація робочого місця розробника повинна відповідати характеру його роботи. Оскільки передбачається проведення тривалого дослідження, яке вимагає концентрації уваги, то робоче місце повинно бути таким, щоб забезпечити максимальний комфорт і зручність. Це означає, що робоче місце повинно бути добре освітленим, мати достатньо місця для зберігання матеріалів та обладнання, а також бути обладнаним таким чином, щоб дослідник міг легко змінювати положення тіла.

Робоче крісло є підйомно-поворотним, регульованим щодо висоти і кутів нахилу сидіння і спинки, а також відстані спинки від переднього краю сидіння, при цьому регулювання кожного параметра крісла є незалежним, легко здійсненим і надійно фіксуватися. Висота поверхні сидіння регулюється в межах 260-460 мм.

Додатково, в процесі аналізу умов праці на робочому місці необхідно оцінити відповідність параметрів приміщення НПАОП 0.00-7.15-18 та відповідність параметрів мікроклімату ДСН 3.3.6.042-99. В приміщенні знаходиться 4 робочих місця обладнаних ПК. Визначаємо параметри приміщення:

1) площа приміщення становить 25,8 м<sup>2</sup>, що в розрахунку на одного працівника становить 6,5 м<sup>2</sup>. Даний показник відповідає нормі щодо площі приміщення на одного працівника відповідно до НПАОП 0.00-7.15-18;

2) об'єм приміщення становить 77,4 м<sup>3</sup>, що в розрахунку на одного працівника (без врахування обладнання) становить 19,35 м<sup>3</sup>. Даний показник не відповідає нормі щодо площі приміщення на одного працівника відповідно до НПАОП 0.00-7.15-18. Відповідно, кількість комп'ютеризованих робочих місць має бути зменшена.

Робоче місце розробника має бути організовано таким чином, щоб забезпечити йому комфорт і зручність під час роботи. Це допоможе йому уникнути перевтоми та ризику для здоров'я. Зокрема, має бути враховано:

1) Розташування екрана: екран повинен бути розташований на рівні очей або трохи нижче, щоб працівник не був змушений був нахилити голову вниз. Це допоможе уникнути навантаження на шию та спину.

2) Розташування клавіатури: клавіатура має бути розташована на рівні ліктів або трохи нижче, щоб розробник не був змушений був нахилити руки вгору. Це допоможе уникнути навантаження на плечі та руки.

3) Розташування миші: миша повинна знаходитися в межах досяжності руки, щоб працівник не був змушений був тягнутися за нею. Це допоможе уникнути навантаження на зап'ястя та кисті рук.

4) Розмір робочого столу: робочий стіл має бути достатньо широким, щоб працівник міг комфортно розмістити на ньому всі необхідні документи та обладнання. Це допоможе уникнути перевтоми та ризику для здоров'я.

### 9.1.2. Електробезпека приміщення

Працюючи з електричним обладнанням необхідно пам'ятати, що ризик ураження електричним струмом залежать від місця проведення робіт. Так, навколишнє середовище може збільшувати або зменшувати силу ураження людини електрострумом і впливати на властивості електричної напруги. Рівень електротравматизму безпосередньо залежить від умов експлуатації електрообладнання. Середовище впливає на нього, особливо на властивості ізоляційних матеріалів, без яких не обходиться жоден електричний пристрій, збільшуючи або зменшуючи силу ураження працівника електрострумом. Вплив несприятливих факторів (кліматичних, погодних, виробничих) на електрообладнання передусім враховують при проектуванні, монтажі та експлуатації.

Усю будівлю електрифіковано згідно з усіма відповідними нормами. Згідно з ПУЕ, приміщення, де експлуатуються екранні пристрої, належать до приміщень

без підвищеної небезпеки ураження людини електричним струмом. Вимоги електробезпеки і пожежної безпеки у приміщеннях, де встановлені екранні пристрої, відображені у НПАОП 0.00-7.15-18: ПК і все устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження роботи їх, електропроводи і кабелі мають відповідати електробезпеці зони за ПВЕ та мати апаратуру захисту від струму короткого замикання.

В приміщенні наявна система автоматичної пожежної сигналізації та пожежогасіння у відповідності до вимог ДБН В.2.5-56:2014, що передбачає використання вогнестійких кабелів в системах живлення та забезпечення автоматичного запуску системи оповіщення та управління евакуацією людей у випадку пожежі. Працівники повинні дотримуватися правил пожежної безпеки, таких як заборона паління в робочих приміщеннях, зберігання пожежогасних засобів та систематично проходити інструктажі з пожежної безпеки.

## 9.2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 9.2.1 Мікроклімат

Залежно від періоду року та категорії робіт законодавством встановлено оптимальні та допустимі величини температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, яких потрібно дотримуватися у робочій зоні виробничих приміщень. Мікроклімат приміщення – це умови внутрішнього середовища приміщення, що впливають на тепловий обмін людини з оточенням шляхом конвекції, кондукції, теплового випромінювання та випаровування вологи. Ці умови визначаються поєднанням температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, температури оточуючих людину поверхонь та інтенсивністю теплового (інфрачервоного) опромінення.

Розробка 3Д моделі та системи керування роботизованої руки відноситься до категорії Іб за енерговитратами (140-174Вт). Допустимі параметри мікроклімату наведені в табл.2.1.



Таблиця 2.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість	Швидкість руху, X
		Допустима	Допустима		
		Верхня межа	Нижня межа	Допустима	Допустима
Холодний	Іб	20-24	17-25	75	не більше 0,2
Теплий		21-28	19-30	55 при 27 °С	0,1-0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні передбачено система опалення, система кондиціонування та систематичне вологе прибирання.

### 9.2.2. Склад повітря робочої зони

Контролювати склад повітря робочої зони необхідно з таких причин:

1) Мінімізація впливу на на здоров'я працівників. Неякісне повітря може призводити до різних захворювань, таких як алергія, астма, респіраторні інфекції, а також до проблем з серцем, нервовою системою та іншими органами.

2) Безпека праці. Забруднене повітря може створювати небезпеку для життя та здоров'я працівників, наприклад, підвищувати ризик виникнення пожеж або вибухів.

3) Ефективність праці. Загазоване повітря знижує продуктивність праці, викликає втому та зниження концентрації уваги.

При роботі системи вентиляції, провітрюванні у приміщенні, де здійснювалося дослідження та розробка 3Д моделі та системи керування роботизованої руки, може попадати пил та інші шкідливі речовини, які виділяються при технологічних процесах на підприємстві і знаходяться повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери в робочій зоні

Назва речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>	Клас
----------------	------------------------	------

	Максимально	Середньо добова	небезпечності
Пил нетоксичний	10	4	4
Оксиди азоту	0,4	0,06	3
Оксид вуглецю	5	3	4

Для забезпечення оптимального складу повітря робочої зони передбачені наступні рішення:

- 1) регулярне провітрювання через вікна, щоб видалити забруднене повітря та подарувати свіже повітря;
- 2) систематичне вологе прибирання для видалення пилу;
- 3) використання вентиляційних систем.

### 9.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення для промислових приміщень, фабрик, цехів і складів має свою специфіку і нормативи, і при дотриманні всіх технічних вимог, підвищує продуктивність праці, зменшує навантаження на зір і забезпечує безпеку для працівників. При розрахунку промислового освітлення завжди потрібно враховувати планування приміщення, рівень природного освітлення, специфіку виробничого процесу, запиленість, вологість і агресивність середовища, і виходячи з цього підібрати необхідне світлотехнічне обладнання. Комфорт і безпека – це головні критерії при розрахунку освітлення виробничих приміщень.

Якісне промислове освітлення дозволяє працівникам виконувати свої задачі скоріше і якісніше, при цьому зменшується втомлюваність і знижуються ризики травматизму. Відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 Система природного освітлення відноситься до бокової. Характеристика зорових робіт – середньої точності. Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 2.4:

Таблиця 2.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, $e_n$ , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє-бокове	Бокове	Верхнє або верхнє-бокове	Бокове
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0	IV	б	середній	середній	200	500	4	1,5	2,4	0,9

Для забезпечення достатнього рівня освітлення в приміщенні передбачено здійснення таких заходів: максимальне використання природного світла; встановлення ефективного штучного освітлення (LED-лампи), проведення регулярного технічного огляду системи освітлення та ретельне планування простору приміщення так, щоб максимально використовувати світло і запобігти перегородженню його потоку.

#### 9.2.4 Виробничий шум

Насичення виробництва машинами і механізмами супроводжується інтенсивним шумом та вібрацією, які справляють негативний вплив на працездатність і здоров'я працівників. Механічні коливання вузлів і деталей викликають коливання повітря і сприймаються органами слуху людини як звуки. Комплекс хаотичних звуків, різних за частотою та інтенсивністю, які викликають неприємні суб'єктивні відчуття, називається шумом. Вплив шуму на організм людини пов'язаний в основному із застосуванням нового, високопродуктивного

устаткування, з механізацією й автоматизацією виробничих процесів, переходом на високі швидкості під час експлуатації верстатів та агрегатів. Джерелами шуму можуть бути двигуни, насоси, компресори, турбіни, пневматичні інструменти, молоти, дробарки, верстати та інші установки, що мають у своєму складі рухомі механізми та обертові деталі.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99. Допустимі нормативні значення рівнів шуму в процесі виконання роботи наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

В приміщенні рівень шуму відповідає нормативним вимогам, однак додатково можна передбачити такі заходи: раціональне розміщення виробничого обладнання та меблів та встановлення загальноприйнятих правил щодо дотримання шумового режиму.

#### 9.2.5. Виробничі випромінювання

На сьогодні властивості електромагнітного випромінювання (ЕМП) використовуються у інтернет-, радіо- та мобільному зв'язку, телебаченні, радіолокації та радіонавігації, у медицині, а також у металургійній, деревообробній, текстильній, легкій та харчовій промисловостях. Наразі у сучасному світі уникнути контакту з електромагнітним випромінюванням майже неможливо. Проте варто зазначити, що навіть у межах одного будинку рівні електромагнітного забруднення можуть варіюватися та змінюватися з часом.

ЕМП можуть впливати на організм людини як безпосередньо, так і опосередковано. Прямий вплив ЕМП може проявлятися у вигляді нагрівання тканин, пошкодження клітин та зміни біологічних процесів. Опосередкований вплив ЕМП може проявлятися у вигляді розвитку захворювань, пов'язаних з порушенням імунної системи, нервової системи та інших органів.

Гранично допустимі рівні електромагнітного поля для працівника під час дослідження та розробки 3Д моделі та системи керування роботизованої руки наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/м <sup>2</sup>
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/м	
Напруженість електромагнітного поля, 6 кГц...3 МГц	50	5	
3 МГц...30МГц	2	-	
30 МГц...5 ГГц	-	-	10
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру: УФ-С (220...280 нм)			0,001
УФ-В (280...320 нм)			0,01
УФ-А (320. ..400 нм)			10,0

в інфрачервоній частині спектру: 0,76... 10,0 мкм			35,0.. .70,0
Напруженість електричного поля ВДТ			20 вВ/м

Для обмеження впливу ЕМП на працівника слід використовувати лише якісну техніку із сертифікатом якості і дотримуватися встановленого часу роботи за ПК.

### 9.2.6 Психофізіологічні фактори

Оцінка психофізіологічних факторів під час дослідження та розробки 3Д моделі та системи керування роботизованої руки здійснюється згідно з Гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу.

Робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) та/або фіксованій позі (неможливість зміни взаєморозташування різних частин тіла відносно одна одної) до 25% часу зміни;

Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження:

Зміст роботи – творча діяльність, що вимагає вирішення складних завдань за відсутності алгоритму.

Сприймання інформації та їх оцінка – сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій;

Розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, виконання завдання та його перевірка.

Сенсорні навантаження:

Зосередження (%за зміну) – до 50%;

Щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150;

Навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80 %;

Навантаження на голосовий апарат ( протягом тижня) – від 16 до 20.

Емоційне навантаження:

Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний;

Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – є відповідальним за безпеку інших.

Режим праці:

Тривалість робочого дня – більше 8 год;

Змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

За зазначеними показниками важкості та напруженості праці, робота, яка виконується належить до допустимого класу умов праці (напруженість праці середнього ступеня).

### 9.3. Безпека в надзвичайних ситуаціях

#### 9.3.1. Особливості впливу іонізуючого випромінювання на людину

До іонізуючих випромінювань можуть бути віднесені електромагнітні коливання з невеликою довжиною хвилі, рентгенівські промені та  $\gamma$ -випромінювання, а також потоки  $\alpha$ - та  $\beta$ -частинок (електронів), протонів, позитронів, нейтронів та інших заряджених частинок. У залежності від проникаючої здатності цих частинок при зовнішньому опромінюванні можливе попадання їх на шкіру або у більш глибокі тканини. Найбільшою проникливою здатністю володіють  $\alpha$ -промені та рентгенівські, меншою –  $\beta$ -промені.

Впливу зовнішнього опромінювання організм зазнає тільки під час перебування людини у сфері впливу випромінювання. У випадку зникнення радіації припиняється і зовнішній вплив, а в організмі можуть розвинути зміни – наслідки опромінювання.

Радіоактивні речовини можуть потрапляти до організму працюючих через легені або шлунково-кишковий тракт, а також через непошкоджену шкіру. Радіоактивне випромінювання не тільки спричинює іонізацію повітря, а й призводить до аналогічного процесу в тканинах організму, значно змінюючи їх. Потрапляючи до організму, радіоактивні речовини заносяться кров'ю у різні тканини та органи і стають джерелом внутрішнього опромінювання. Особливою загрозою для організму є ізотопи, які протягом усього життя потерпілого можуть бути джерелами іонізуючого випромінювання.

Впливу іонізуючого випромінювання можуть зазнати працюючі з рентгенівськими та  $\gamma$ -променями під час здійснення  $\gamma$ -дефектоскопії на промислових підприємствах, обслуговуючий персонал прискорювальних установок і ядерних реакторів, а також зайняті розвідкою та добуванням корисних копалин тощо. Наразі вирішені основні питання радіаційної безпеки. Однак при порушеннях вимог безпеки або за певних обставин іонізуюче випромінювання може спричинити розвиток променевої хвороби (гострої та хронічної).

З метою профілактики необхідна раціональна організація праці, дотримання норм радіаційної безпеки. Всі види робіт повинні мати ефективну екранізацію. При роботах із закритими джерелами випромінювання слід дотримуватись правил схову і переносу ампул з використанням контейнерів, маніпуляторів. Велике значення має дозиметричний контроль, проведення попередніх і періодичних медичних оглядів, а також дотримування медичних протипоказань щодо осіб, які приймаються на роботу з радіоактивними речовинами.

### 9.3.2. Розрахунок коефіцієнта протирадіаційного захисту підвального приміщення

Коефіцієнт протирадіаційного захисту приміщення, в якому перебуватимуть люди розраховуватимемо за формулою

$$K_3 = \frac{0,65 \times K_1 \times K_{CT}}{(1 - K_{Ш})(K_0 \times K_{CT} + 1) K_M}$$



Основні характеристики:

1. Зовнішні стіни з сандвіч панелей (30 см), маса  $1\text{ м}^2 - 54\text{ кг}$ .
2. Перегородки цегляні (12 см), маса  $1\text{ м}^2 - 216\text{ кг}$ .
3. Площа віконних прорізів: В-1 –  $1,65\text{ м}^2$ .
4. Площа дверних прорізів: Д-2 –  $1,9\text{ м}^2$ .
5. Висота підвіконників – 1 м;
6. Площа підлоги для розрахунку приміщення –  $72\text{ м}^2$ ;
7. Висота приміщення – 3 м;
8. Ширина зараженої ділянки, що примикає до приміщення – 12 м;
9. Маса  $1\text{ м}^2$  перекриття –  $290\text{ кг/м}^2$ ;
10. Плоскі кути приміщення:

Кут  $\alpha_1 = 53^\circ$ . Проти кута розташовані:

- зовнішня стіна з сандвіч панелей (30 см) площею  $18\text{ м}^2$ ;
- 6 внутрішніх стін з цегли (12 см) площею  $18\text{ м}^2$ ;
- 5 внутрішніх стін з цегли (12 см) площею  $18\text{ м}^2$  з прорізом площею  $4,75\text{ м}^2$ .

Кут  $\alpha_2 = 127^\circ$ . Проти кута розташовані:

- зовнішня стіна з сандвіч панелей (30 см) площею  $36\text{ м}^2$  з прорізом площею  $6,6\text{ м}^2$ ;
- 2 внутрішніх стіни з цегли (12 см) площею  $36\text{ м}^2$  з прорізом площею  $1,9\text{ м}^2$ ;
- внутрішня стіна з цегли (12 см) площею  $36\text{ м}^2$ ;
- внутрішня стіна з цегли (12 см) площею  $36\text{ м}^2$  з прорізом площею  $7,6\text{ м}^2$ .

Кут  $\alpha_3 = 53^\circ$ . Проти кута розташована:

- 2 внутрішніх стіни з цегли (12 см) площею  $18\text{ м}^2$  з прорізом площею  $1,9\text{ м}^2$ ;
- 3 внутрішніх стіни з цегли (12 см) площею  $18\text{ м}^2$  з прорізом площею  $4,75\text{ м}^2$ ;
- зовнішня стіна з сандвіч панелей (30 см) площею  $18\text{ м}^2$ .

Кут  $\alpha_4 = 127^\circ$ . Проти кута розташована:

- зовнішня стіна з сандвіч панелей (30 см) площею  $36\text{ м}^2$  з прорізом площею  $6,6\text{ м}^2$ .

Визначаємо масу  $1\text{ м}^2$  стін і перегородок, розташованих проти плоских кутів.

Кут  $\alpha_1 = 53^\circ$ .

Маса  $1\text{ м}^2$  зовнішньої стіни з сандвіч панелей (30 см) площею  $18\text{ м}^2$ ;

$$G_{\text{пр}} = 54 \text{ (кг)} .$$

Маса 1 м<sup>2</sup> 6-ти внутрішніх стін з цегли (12 см) площею 18 м<sup>2</sup>

$$G_{\text{пр}} = 216 \times 6 = 1296 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м<sup>2</sup> 5-ти внутрішніх стін з цегли (12 см) площею 18 м<sup>2</sup> з прорізом площею 4,75 м<sup>2</sup>

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{4,75}{18} = 0,26, G_{\text{пр}} = 5 \times 216(1 - 0,26) = 799,2 \text{ (кг)}.$$

Сумарна маса 1 м<sup>2</sup> стін і перегородок плоского кута  $\alpha_1$

$$G_{\Sigma}^1 = 799,2 + 1296 + 54 = 2149,2 \text{ (кг)}.$$

Кут  $\alpha_2 = 127^\circ$ .

Маса 1 м<sup>2</sup> зовнішньої стіни з сандвіч панелей (30 см) площею 36 м<sup>2</sup> з прорізом площею 6,6 м<sup>2</sup>

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{6,6}{36} = 0,18, G_{\text{пр}} = 54(1 - 0,18) = 44,3 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м<sup>2</sup> 2-х внутрішніх стін з цегли (12 см) площею 36 м<sup>2</sup> з прорізом площею 1,9 м<sup>2</sup>

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{1,9}{36} = 0,05, G_{\text{пр}} = 2 \times 216(1 - 0,05) = 410,4 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м<sup>2</sup> внутрішньої стіни з цегли (12 см) площею 36 м<sup>2</sup>

$$G_{\text{пр}} = 216 \text{ (кг)}$$

Маса 1 м<sup>2</sup> внутрішньої стіни з цегли (12 см) площею 36 м<sup>2</sup> з прорізом площею 7,6 м<sup>2</sup>

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{7,6}{36} = 0,21, G_{\text{пр}} = 216(1 - 0,21) = 170,6 \text{ (кг)}.$$

Сумарна маса 1 м<sup>2</sup> стін і перегородок плоского кута  $\alpha_2$

$$G_{\Sigma}^2 = 44,3 + 410,4 + 216 + 170,6 = 841,3 \text{ (кг)}.$$

Кут  $\alpha_3 = 53^\circ$ .

Маса 1 м<sup>2</sup> 3-х внутрішніх стін з цегли (12 см) площею 18 м<sup>2</sup> з прорізом площею 4,75 м<sup>2</sup>

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{4,75}{18} = 0,26, G_{\text{пр}} = 3 \times 216(1 - 0,26) = 479,5 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м<sup>2</sup> 2-х внутрішніх стін з цегли (12 см) площею 18 м<sup>2</sup> з прорізом площею 1,9 м<sup>2</sup>

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{1,9}{18} = 0,11, G_{\text{пр}} = 2 \times 216(1 - 0,11) = 384,5 \text{ (кг)}.$$

Маса 1 м<sup>2</sup> зовнішньої стіни з сандвіч панелей (30 см) площею 18 м<sup>2</sup>;

$$G_{\text{пр}} = 54 \text{ (кг)} .$$

Сумарна маса 1 м<sup>2</sup> стін плоского кута  $\alpha_3$

$$G_{\Sigma}^3 = 54 + 384,5 + 479,5 = 918 \text{ (кг)}.$$

Кут  $\alpha_4 = 127^\circ$ .

Маса 1 м<sup>2</sup> зовнішньої стіни з сандвіч панелей (30 см) площею 36 м<sup>2</sup> з прорізом площею 6,6 м<sup>2</sup>

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{6,6}{36} = 0,18, G_{\text{пр}} = 54(1 - 0,18) = 44,3 \text{ (кг)}.$$

Сумарна маса 1 м<sup>2</sup> стін плоского кута  $\alpha_4$

$$G_{\Sigma}^3 = 44,3 \text{ (кг)}.$$

Сумарні зведені маси стін і перегородок

$$G_{\Sigma}^1 = 2149,2 \text{ (кг/м}^2\text{)}; G_{\Sigma}^2 = 841,3 \text{ (кг/м}^2\text{)};$$

$$G_{\Sigma}^3 = 918 \text{ (кг/м}^2\text{)}; G_{\Sigma}^4 = 44,3 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

Сумарна маса стін і перегородок проти першого плоского кута приміщення більша за 1000 кг/м<sup>2</sup>, тому при визначенні коефіцієнта  $K_1$ , її не враховуватимемо

$$K_1 = \frac{360}{36 + \sum \alpha_i} = \frac{360}{36 + 303} = 1,06.$$

За мінімальною зведеною сумарною масою стін визначаємо коефіцієнт  $K_{\text{ст}} = 2$ .

За шириною будівлі визначаємо коефіцієнт, який враховує долю розсіювання випромінювання  $K_{\text{ш}} = 0,47$  (висота приміщення складає 3 м).

Коефіцієнт  $K_0$ , що враховує зниження поглинальної здатності зовнішніх стін за рахунок наявності в них віконних і дверних прорізів та проникнення в приміщення вторинного випромінювання, з врахуванням висоти від підлоги до вікон 1 м розрахуємо

$$K_0 = 0,8 \frac{S_0}{S_{\text{П}}} = 0,8 \frac{4,75}{72} = 0,05,$$

де  $S_0 = 4,75 \text{ м}^2$  – загальна площа зовнішніх віконних і дверних прорізів приміщення;  $S_{\text{п}} = 72 \text{ м}^2$  – площа підлоги приміщення.

Коефіцієнт, що враховує зниження дози радіації в приміщенні, розташованому в будівлі, від екранувальної дії сусідніх споруд  $K_M=0,55$ .

Тоді

$$K_3 = \frac{0,65 \times K_1 \times K_{CT}}{(1 - K_{III})(K_0 \times K_{CT} + 1)K_M} = \frac{0,65 \times 1,06 \times 2}{(1 - 0,47)(0,05 \cdot 2 + 1)0,55} = 4,3$$

Проведені для підвального приміщення розрахунки показали, що коефіцієнт протирадіаційного захисту цього приміщення складає 4,3, тому воно не може бути використане для перебування людей в умовах радіаційного забруднення, а всі хто перебуватиме в ньому мають бути переведені в більш захищені приміщення або евакуйовані.

## ВИСНОВКИ

В магістерській дисертації було вирішено важливе завдання розробки ефективної та економічно доступної антропоморфної робототехнічної кінцівки. Розглянуті аспекти системи керування BLDC, методика конструювання та налаштування силових компонентів отримали детальний розвиток у даній роботі, яка успішно вирішила важливу проблему в галузі проектування.

1. Проведено аналіз сучасних робототехнічних рук та методів передачі руху, враховано механічні та електричні конструкції робототехнічних кінцівок. Кінематика та динаміка людської руки були вивчені для розробки кісті робототехнічної руки, обрано ниткову тягу та датчик вигину для передачі руху та вимірювань.

2. Визначено сервоприводи MG996R як двигуни для робототехнічної руки, але зазначено високу вартість датчиків вигину, що викликало рішення їх самостійного виготовлення. Обрано акумулятор Xiaomi Mi Power Bank 3 для автономного живлення робототехнічної руки.

3. Вибрано та обґрунтовано конструкцію робочої установки, створено моделі та надруковано їх на 3D-принтері для забезпечення міцності та економічної вигоди.

4. Обрано систему керування для безколекторного двигуна постійного струму.

5. Здійснено математичне моделювання обраної системи у середовищі MATLAB/Simulink, виокремлено переваги S-подібного завдання на переміщення для позиційних механізмів, забезпечено збірку робототехнічної руки та створено програму на Arduino для керування.

6. Розрахована вартість проекту, яка складає 8741 гривень.

7. Розроблено стартап-проект для ринкової реалізації, включаючи технічний аудит ідеї, аналіз можливостей, стратегії розвитку та маркетингову програму. Представлено переваги та недоліки проекту, а також виявлені основні ризики ринкової реалізації. Аналіз підтвердив можливість конкурентоспроможності проекту за певних умов.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Компанія Ottobock. – URL: <https://www.ottobock.com/en-us/product/8E70>
2. Компанія Össur. – URL: <https://www.ossur.com/en-us/prosthetics/arms/i-limb-ultra-titanium>
3. Компанія BrainRobotics. – URL: <https://brainrobotics.com/>
4. Компанія Youbionic. – URL: <https://www.youbionic.com/>
5. Компанія Shadow Robot. – URL: <https://www.shadowrobot.com>
6. Компанія DIY Prosthetic Hand & Forearm. – URL: <https://www.instructables.com/Voice-Controlled-Prosthetic-Hand-Forearm/>
7. Датчики ЕМГ. – URL: <https://www.ourpcb.com/emg-sensors.html>
8. Тензодатчик. – URL: <https://www.omega.co.uk/prodinfo/StrainGauges.html>
9. Модуль Fortebit EasyVR. – URL: <https://www.mouser.com/new/fortebit/fortebit-easyvr-3-plus-module/>
10. Інтерфейси мозок-комп'ютер. – URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3497935>
11. Компанія Inmoov Robot. – URL: <http://inmoov.fr/>
12. Сервопривод MG996R. – URL: [https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R\\_Tower-Pro.pdf](https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R_Tower-Pro.pdf)
13. Контролер ATMEGA328. – URL: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/392243/ATMEL/ATMEGA328/310/2/ATMEGA328.html>
14. Плата Arduino UNO. – URL: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>
15. Hao Wu, Xinya Sun, Yindong Ji. Precise Speed Control of Brushless DCMotors Based on Optimal Control: Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Xi'an, China, 2008. 431 p.
16. Momenzadeh M. M., Ahmed A. F., Tolba A. Modelling and Simulation of The BLDC Electric Drive System Using SIMULINK/MATLAB for a Hybrid Vehicle. Paderborn, IL: Paderborn University, 2014. 8-11 pp.

17. Shane W. Colton. Design and Prototyping Methods for Brushless Motors and Motor Control. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010. 135p.
18. Omar H. B. Design of Driver Brushless Direct Current Motor (BLDC). Melaka: Universiti Teknikal Kebangsaan Malaysia, 2005. 27 p.
19. Brown W. Brushless DC Motor Control Made Easy. Microchip Technology Inc, 2002. 48 p.
20. Kim T., Park B., Lee D., Ryu J., Hyun D. A New Approach to Sensorless Control Method for Brushless DC Motors. Seoul: Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE), 2008. pp. 477-487
21. A. Purna Chandra Rao, Y. P. Obulesh, CH. Sai Babu. Performance Improvement of BLDC Motor with Hysteresis Current Controller. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 2, Issue 12, December 2013.
22. D. C. Hanselman. Brushless Permanent Magnet Motor Design. Magna Physics Publishing, 2006. 392 p.
23. Програмування Ардуїно. – URL: <https://all-arduino.ua/arduino-dlya-nachinayushhih/>
24. Розробка та аналіз функціонального протеза руки з нейрофізіологічною системою управління. – URL: <http://elib.spbstu.com/dl/2/v17-441.pdf/info>
25. Безщіткові двигуни постійного струму. – URL: <https://oborudow.com/uk/suspension/chto-takoe-beskollektorny-dvigatel-postoyannogo-toka-i-ego-princip-raboty/>
26. Конструкція біонічного протеза руки. – URL: <https://habr.com/ua/post/572146/>
27. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
28. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості



трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу:  
[http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14.\\_nakazy\\_ta\\_rozpor\\_183575/248+58074-detail.html](http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14._nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html)

29. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=79885](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885)

30. ДБН В.2.5-56:2014 Системи протипожежного захисту. - [Електронний ресурс] - Режим доступу:  
<http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/98.156~2014.pdf>

31. ДСанПіН 3.3.6.096-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. // Офіційний вісник України від 07.09.2009 - 2009 р., № 66.

32. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

33. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: [http://sop.zp.ua/norm\\_praop\\_0\\_00-7\\_15-18\\_01\\_ua.php](http://sop.zp.ua/norm_praop_0_00-7_15-18_01_ua.php)

34. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

35. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги - [Електронний ресурс] - [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=71028](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028)

36. НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://antifire.ua/dbn/10.pdf>

ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Дослідження та розробка 3D моделі та системи керування  
роботизованої руки

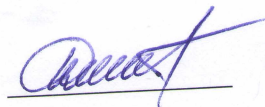
Тип роботи: МКР

Підрозділ: кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

**Показники звіту подібності Unichesk**  
**Оригінальність 81,1 %**                      **Схожість 18,9 %**

- 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку



Штофель Д. Х.

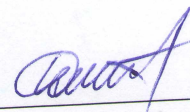
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи



Левандовський К. С.

Керівник роботи



Штофель Д. Х.