

**Міністерство освіти і науки України**

**Луцький національний технічний університет**

(повне найменування вищого навчального закладу)

**Факультет транспорту та механічної інженерії**

(повне найменування факультету)

**Кафедра прикладної механіки та мехатроніки**

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»  
РОЗРОБКА УПРАВЛІННЯ СКЕЛЕТНИХ  
ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ  
МІКРОКОНТРОЛЕРА ARDUINO**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ІМм-21  
Шульган Дмитро Олександрович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник:  
д.т.н., професор  
Повстяной Олександр Юрійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.  
Гарант освітньої програми:  
к.т.н., доцент  
Четвержук Тарас Іванович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2025 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *транспорту та механічної інженерії*

Кафедра *прикладної механіки та мехатроніки*

Ступінь вищої освіти: *магістр*

Галузь знань: *13 Механічна інженерія*

Спеціальність: *131 Прикладна механіка*

Освітня програма: *«Прикладна механіка»*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Р. Г. Редько

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ДРУГОГО (МАГІСТЕРСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Шульгана Дмитра Олександровича*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Розробка управління скелетних динамічних систем на основі*

*мікроконтролера ARDUINO*

Керівник роботи: *д.т.н., професор Повстяной Олександр Юрійович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» червня 2025 року №391/01-07

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: «1» грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: *мікроконтролер ARDUINO, кінематичні та динамічні*

*Характеристики людської руки*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. *Підходи щодо моделювання систем керування роботизованими установками.*

2. *Спеціалізовані програми і методи моделювання систем керування роботами.*

3. *Обґрунтування вибору мови програмування та програмно-апаратної платформи*

4. *Розробка автоматизованої смарт-руки робота на платформі Arduino*

5. Перелік графічного матеріалу :

*графічний матеріал виконано у вигляді презентації, яка складається з 10 слайдів*

#### 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ                                | Прізвище,<br>ініціали та<br>посада<br>консультанта | Підпис, дата      |                     |
|---------------------------------------|--|-------------------|---------------------|
|                                       |  | завдання<br>видав | завдання<br>прийняв |
| <i>Розділ 1</i>                       | <i>Повстяной<br/>О.Ю.</i>                          |                   |                     |
| <i>Розділ 2</i>                       | <i>Повстяной<br/>О.Ю.</i>                          |                   |                     |
| <i>Розділ 3</i>                       | <i>Повстяной<br/>О.Ю.</i>                          |                   |                     |
| <i>Розділ 4</i>                       | <i>Повстяной<br/>О.Ю.</i>                          |                   |                     |
| <i>Нормоконтроль</i>                  |  |                   |                     |
| <i>Показник запозичень<br/>тексту</i> |  |                   |                     |
| <i>Академічна доброчесність</i>       | <i>Полінкевич Р.М.</i>                             |                   |                     |

7. Дата видачі завдання 14.06.2025 р.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| N<br>з/п | Назва етапів<br>кваліфікаційної роботи<br>магістра             | Строк<br>виконання<br>етапів<br>роботи | Примітка       |
|----------|--|--|----------------|
| 1        | <i>Аналіз проблеми за темою роботи та постановка<br/>задач</i> | <i>01.09.2025<br/>р.</i>               | <i>виконав</i> |
| 2        | <i>Аналіз і вибір напрямків дослідження</i>                    | <i>10.09.2025<br/>р.</i>               | <i>виконав</i> |
| 3        | <i>Теоретичне дослідження та практична<br/>реалізація</i>      | <i>20.09.2025<br/>р.</i>               | <i>виконав</i> |
| 4        | <i>Опис засобів розробки об'єкта проєктування</i>              | <i>01.10.2025<br/>р.</i>               | <i>виконав</i> |
| 5        | <i>Загальні висновки та рекомендації</i>                       | <i>20.10.2025<br/>р.</i>               | <i>виконав</i> |
| 6        | <i>Оформлення роботи</i>                                       | <i>10.11.2025<br/>р.</i>               | <i>виконав</i> |

|   |   |                      |                |
|---|---|----------------------|----------------|
| 7 | <i>Оформлення презентації</i>                                     | <i>20.11.2025 р.</i> | <i>виконав</i> |
| 8 | <i>Здача чистового варіанту кваліфікаційної роботи на кафедру</i> | <i>01.12.2025 р.</i> | <i>виконав</i> |
|   |   |                      |                |

Здобувач вищої освіти

\_\_\_\_\_ (підпис)

*Шульган Д. О.*

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

*Повстяной О. Ю.*

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Шульган Д. О. Розробка управління скелетних динамічних систем на основі мікроконтролера ARDUINO. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел.

Досліджено основні принципи та методи створення науково-дослідної демонстраційної установки механізованої штучної руки робота-аватара, реалізованої на базі платформи Arduino, що забезпечує відтворення кінематичних і динамічних характеристик природної руки людини. Сформовано функціональну схему процесу автоматизації, виконано обґрунтований вибір технічних засобів автоматизації та розроблено модуль контролю й управління. Розроблено електричну принципову схему підключення сенсорних елементів і виконавчих механізмів до керуючого контролера, а також програмне забезпечення, що забезпечує функціонування управляючого модуля. Проведено інженерні розрахунки та виконано техніко-економічне обґрунтування створеної установки. Запропонована розробка штучної руки робота-аватара може бути використана як експериментальна платформа для наукових та навчально-практичних досліджень з перспективою подальшого застосування при розв'язанні задач медичної реабілітації осіб з інвалідністю та дослідженні біомеханічних механізмів руху природної руки людини.

Ключові слова: робот, автоматизована система керування, механізм, рука робота.

## ABSTRACT

Shulgan D. Development of control of skeletal dynamic systems based on the ARDUINO microcontroller. Manuscript.

Master's qualification work OP «Applied Mechanics» specialty 131 Applied Mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Master's qualification work consists of an introduction, 4 sections, conclusions, list of used sources.

The basic principles and methods of creating a research demonstration installation of a mechanized artificial hand of a robot-avatar, implemented on the basis of the Arduino platform, which provides reproduction of the kinematic and dynamic characteristics of a natural human hand, have been studied. A functional diagram of the automation process has been formed, a justified choice of technical means of automation has been made and a control and management module has been developed. An electrical schematic diagram of connecting sensor elements and actuators to the control controller has been developed, as well as software that ensures the functioning of the control module. Engineering calculations have been carried out and a feasibility study of the created installation has been carried out. The proposed development of an artificial robot-avatar hand can be used as an experimental platform for scientific and educational and practical research with the prospect of further application in solving the problems of medical rehabilitation of people with disabilities and studying the biomechanical mechanisms of movement of the natural human hand.

Keywords: robot, automated control system, mechanism, robot hand.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 7  |
| РОЗДІЛ 1 ПІДХОДИ ЩОДО МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОБОТИЗОВАНИМИ УСТАНОВКАМИ ГУМАНОЇДНОГО ТИПУ..... | 10 |
| 1.1 Огляд методів проектування актуальних систем біомеханіки.....                                    | 10 |
| 1.2 Смарт-протезування як можливість застосування динамічних моделей біомеханіки.....                | 12 |
| 1.3 Огляд наукових досліджень у сфері прикладної біомеханіки.....                                    | 14 |
| 1.4 Поставка завдань на кваліфікаційну роботу.....   | 16 |
| РОЗДІЛ 2 СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ПРОГРАМИ І МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОБОТАМИ.....                 | 18 |
| 2.1 Сучасні методи реалістичної реконструкції людського тіла та проектування роботів.....            | 18 |
| 2.2 Використання сучасних технологій для проектування роботів гуманоїдів.....                        | 20 |
| 2.3 Гуманоїдні сценарії.....   | 24 |
| РОЗДІЛ 3 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ ТА ПРОГРАМНО-АПАРATНОЇ ПЛАТФОРМИ.....               | 27 |
| 3.1 Історія та основні характеристики програмної платформи Arduino.....                              | 27 |
| 3.2 Архітектура та основні компоненти платформи.....   | 29 |
| 3.3 Переваги та обмеження використання Arduino для розробки роботизованих систем.....                | 31 |
| 3.4 Опис мови програмування Arduino та огляд популярних середовищ розробки.....                      | 32 |
| 3.5 Аналіз переваг та обмежень платформи Arduino для розробки роботизованих систем.....              | 35 |
| 3.6 Використання методів прикладного наукового дослідження.....                                      | 39 |
| РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СМАРТ-РУКИ РОБОТА НА ПЛАТФОРМИ ARDUINO.....                        | 41 |

|   |    |
|---|----|
| 4.1 Особливості процесу проектування.....                                 | 43 |
| 4.2 Реалізація процесу створення механізованої руки робота-гуманоїда..... | 48 |
| 4.3 Створення електричної схеми гнучких сенсорів.....                     | 50 |
| 4.4 Встановлення і монтаж модуля керування рукою.....                     | 53 |
| ВИСНОВКИ.....   | 56 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....   | 58 |
| ДОДАТКИ.....  | 64 |

## ВСТУП

**Актуальність дослідження** зумовлена необхідністю реалістичної реконструкції елементів людського тіла, що має принципове значення для широкого кола міждисциплінарних наукових і прикладних напрямів, зокрема робототехніки, медико-реабілітаційних наук, клінічної медицини, медико-біологічних досліджень, а також сфер освіти, сервісу та індустрії розваг.

У межах кваліфікаційної роботи досліджуються методологічні засади та здійснюється аналіз існуючих прототипів побудови складних роботизованих біомеханічних комплексів з інтелектуальними системами керування на основі модельного підходу та комп'ютерного моделювання. Це обумовлено тим, що будь-який медичний або реабілітаційний пристрій повинен пройти етапи попереднього тестування і верифікації до його практичного застосування, зокрема для надання допомоги особам з обмеженими функціональними можливостями. Сучасні обчислювальні методи та комп'ютерні технології дають змогу створювати достовірні та високоточні математичні й імітаційні моделі, здатні комплексно оцінювати продуктивність пристрою та ефективність його впливу на уражені біологічні структури, що є особливо важливим на ранніх стадіях проєктування та розроблення прототипів.

Одним із ключових аспектів наукового дослідження і проєктування сучасних автоматизованих біомеханічних систем є глибоке розуміння закономірностей складних рухів кінематичних ланок, які виникають під час функціонування різних частин тіла живого організму, зокрема людини. Розроблення штучних систем, здатних адекватно імітувати рухи людського тіла, актуалізує питання їх маніпуляційних можливостей, що, у свою чергу, визначає високу наукову й практичну значущість досліджень у галузі біомеханічного протезування. Зокрема, для створення ергономічного, легкого у використанні та естетично привабливого протеза руки необхідно здійснити всебічне дослідження природної руки людини, побудувати її кінематичну модель та на цій основі розробити відповідний біомеханічний прототип.

Важливою складовою зазначених досліджень є динамічне моделювання рухів руки людини, оскільки її нормальна фізіологічна діяльність супроводжується складними динамічними процесами. Рука людини є багатоланковим механізмом із великою кількістю ступенів свободи, що зумовлює необхідність урахування як кінематичних, так і динамічних характеристик під час її моделювання. Розроблені в межах даної роботи моделі рук і кистей ґрунтуються на аналізі кінематики та динаміки рухів і можуть бути використані як надійна методологічна та експериментальна основа для створення сучасних протезів верхніх кінцівок з інтелектуальними системами керування. З огляду на ключову роль руки у життєдіяльності людини, особливої актуальності набуває завдання якнайшвидшого та максимально повного відновлення її функціональних можливостей у осіб, які втратили їх унаслідок травм або захворювань. Обмежена кількість ефективних пристроїв для реабілітації кисті, представлених на сучасному ринку, додатково підкреслює потребу в розробленні нових технічних рішень, спрямованих на підвищення якості та ефективності відновлення рухових функцій.

**Метою кваліфікаційної роботи** є створення науково-дослідної демонстраційної установки-імітатора механізованої штучної руки робота-аватара на базі платформи Arduino, яка відтворює кінематичні та динамічні властивості природної руки людини і може використовуватися як експериментальна платформа для навчально-практичних досліджень зі застосуванням у сфері медичної реабілітації осіб з інвалідністю та вивчення біологічних механізмів руху руки людини.

**Об'єкт дослідження** – процеси моделювання динаміки руху біомеханічної системи створення механізованої штучної руки робота-аватара, що імітує природну руку людини та її динамічні характеристики.

**Предмет дослідження** – методи проєктування, програмування та комп'ютерного моделювання роботизованих біомеханічних систем.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено розв'язання таких **завдань**:

- аналіз технологічних основ виготовлення прототипів кінцівок і частин тіла роботів-гуманоїдів та дослідження можливостей їх застосування у різних галузях науки, техніки й науково-дослідних платформах біомеханічних систем;
- вивчення систем керування рухом і аналіз існуючих динамічних моделей кисті та руки людини, що використовуються для імітації природних рухів;
- аналіз динамічних процесів функціонування руки робота-гуманоїда як об'єкта керування, розроблення функціональної схеми автоматизованої системи керування, вибір технічних засобів автоматизації, розроблення принципів електричних схем;
- створення науково-дослідної установки механізованої штучної руки робота-аватара, що імітує природну руку людини та її динаміку, з метою використання у навчально-практичних експериментах і подальшого можливого впровадження у медико-реабілітаційній практиці.

**Сфера застосування та практична новизна** полягають у розробленні науково-дослідної установки механізованої штучної руки робота, яка може використовуватися як універсальна експериментальна платформа для навчальних, прикладних та наукових досліджень. Отримані результати можуть бути використані фахівцями у галузях біомеханіки, медицини та інженерії для підбору оптимальних протезних рішень для осіб з порушеннями функцій опорно-рухового апарату відповідно до їх індивідуальних потреб.

**Особистий внесок магістранта.** Основні результати, висновки та положення, а також рекомендації отримані автором самостійно з відповідним консультуванням наукового керівника.

# РОЗДІЛ 1

## ПІДХОДИ ЩОДО МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОБОТИЗОВАНИМИ УСТАНОВКАМИ ГУМАНОЇДНОГО ТИПУ

### 1.1 Огляд методів проектування актуальних систем біомеханіки

На сучасному етапі розвитку науки і техніки розроблення штучних систем, здатних імітувати будову людського тіла та його динамічні характеристики, породжує низку актуальних і перспективних наукових завдань, що зумовлюють особливу значущість напрямку біомеханічного протезування. Зокрема, для створення простого у використанні, малогабаритного та естетично привабливого протеза верхньої кінцівки необхідним є ґрунтовне дослідження природної руки людини, побудова її адекватної кінематичної моделі та подальше проектування відповідного біомеханічного прототипу. Отримані моделі можуть бути використані як надійна методологічна й експериментальна основа для розроблення ефективних протезів рук людини з інтелектуальною компонентою керування.

У зв'язку з цим актуальним завданням сучасних наукових досліджень є вивчення методів моделювання та керування рухами верхніх і нижніх кінцівок людини, проведення аналізу динамічних процесів їх функціонування, а також розроблення методичних засад створення прототипів апаратів механотерапії та технічних засобів реабілітації осіб з порушеннями рухових функцій кінцівок. Особливого значення набуває розроблення таких пристроїв із використанням методів комп'ютерного моделювання, результатом чого є модельна реконструкція рухів людини та кількісна оцінка її біомеханічних можливостей і відповідних природних рухів кінцівками.

Одним із важливих завдань даного дослідження є демонстрація можливостей застосування різних теоретичних і аналітичних математичних методів для аналізу опорно-рухових динамічних систем, а також для розв'язання біомеханічних задач реабілітації, аналізу та синтезу систем керування складними біомеханічними об'єктами. Дослідження ґрунтується на використанні таких підходів, як математичне моделювання на основі динамічних моделей у просторі

станів, комп'ютерне моделювання та методи теорії систем. Застосування зазначених методів спрямоване на адаптацію теоретичних напрацювань до практичних задач покращення стану здоров'я людини, підвищення ефективності реабілітаційних процесів, розвитку навчальних IoT-орієнтованих систем, а також створення новітніх моделей мехатронних пристроїв.

Поряд із теоретичними дослідженнями важливе місце займають експериментальні кінематичні вимірювання динаміки м'язової активності, зокрема визначення швидкостей, прискорень і крутних моментів у суглобах верхніх і нижніх кінцівок, а також аналіз роботи м'язів-розгиначів кульшового та колінного суглобів, гомілковостопного, колінного й тазостегнового суглобів. Отримані експериментальні дані можуть свідчити про наявність нетривіальних моделей м'язової активності та забезпечують цінну інформацію щодо біомеханічних закономірностей і стратегій керування моторикою людини.

У результаті проведення таких досліджень стає можливим застосування сучасних технологій, заснованих на аналітичних моделях, для виконання теоретичних і практичних наукових досліджень, оприлюднення отриманих результатів та формування кола ключових питань і проблем для подальших наукових розвідок. У цьому контексті особливої уваги потребує аналіз сучасних розробок у галузі методології проектування роботизованих пристроїв, а також підходів до нелінійного керування та забезпечення стійкості складних біомеханічних і мехатронних систем.

Зазначені дослідження спрямовані на розроблення оптимальних стратегій керування біомеханічними системами із використанням сучасних модельно-орієнтованих технологій та засобів комп'ютерного моделювання. При цьому здійснюється порівняльний аналіз відомих теоретичних методів і підходів до проектування ефективних систем керування з метою виокремлення найбільш результативних умов забезпечення стійкості та стратегій керування з урахуванням ефективності їх реалізації та можливості адаптації в національних умовах. Такі дослідження мають на меті подальше вдосконалення існуючих технологій на основі отриманих експериментальних і модельних результатів.

## 1.2 Смарт-протезування як можливість застосування динамічних моделей біомеханіки

Дослідження існуючих динамічних моделей верхніх і нижніх кінцівок людини, а також їх математичне моделювання, можуть бути ефективно використані для визначення основних конструктивних і функціональних параметрів протезів та протезних систем на ранніх етапах їх проєктування, а також для аналізу систем керування і оцінювання стійкості функціонування таких технічних засобів. Застосування модельно-орієнтованих підходів на початкових стадіях розроблення дає змогу знизити технічні ризики, скоротити терміни проєктування та підвищити надійність кінцевих рішень.

Теоретично спроектовані та віртуально апробовані пристрої можуть бути використані у процесах медичної реабілітації в галузях кінезіології та фізіотерапії, оскільки відповідні конструкції забезпечують дозоване навантаження на нижні та верхні кінцівки шляхом імітації м'язової активності, сприяють відновленню рухових функцій і запобігають негативним наслідкам тривалої вимушеної іммобілізації. З огляду на визначальну роль кінцівок у життєдіяльності людини, особливої актуальності набуває завдання якнайшвидшого та максимально повного відновлення ефективності їх функціонування у осіб, які втратили рухові можливості внаслідок травм або захворювань. Обмежена кількість високоефективних реабілітаційних пристроїв, представлених на сучасному ринку, зумовлює об'єктивну потребу в розробленні нових, більш результативних технічних рішень.

У зв'язку з цим дана кваліфікаційна робота орієнтована на аналіз теоретичних підходів і застосування методів комп'ютерного моделювання, оскільки будь-який медичний або реабілітаційний пристрій повинен пройти етапи попереднього моделювання, випробувань та верифікації до його практичного впровадження для допомоги особам з обмеженими функціональними можливостями. Сучасні обчислювальні засоби та чисельні методи дозволяють створювати достовірні й високоточні моделі, здатні

комплексно оцінювати продуктивність пристрою та ефективність його впливу на уражені біологічні структури.

Світовий досвід застосування високотехнологічних протезів і екзоскелетів у реабілітації опорно-рухового апарату свідчить, що такі пристрої є одним із найбільш перспективних та ефективних інструментів відновлення й підвищення рухової активності осіб з різними формами дисфункції верхніх і нижніх кінцівок.

У зв'язку з цим особливої значущості набуває розроблення теоретичних основ створення функціональних прототипів високотехнологічних протезів і екзоскелетів, призначених для реабілітації осіб з інвалідністю, насамперед із порушеннями функцій нижніх кінцівок. Невід'ємною складовою цього процесу є формування віртуалізованих прототипів на основі математичного та комп'ютерного моделювання, а також проведення системного аналізу з метою виявлення критичних елементів конструкцій і визначення шляхів їх удосконалення як з точки зору механічної структури, так і функціональних можливостей.

У цьому контексті ключового значення набуває вимірювання та аналіз кінематичних і динамічних параметрів оптимальних рухів прототипів протезів, що забезпечує можливість тестування, верифікації та проєктування подальших удосконалених конструктивних рішень. Отримані дані дозволяють оптимізувати функціональні властивості прототипів за критеріями механічної ефективності, стійкості руху та якості систем керування, зокрема інтелектуального типу.

Результати сучасних наукових досліджень створюють передумови для переходу до серійного виробництва високотехнологічних протезів, у тому числі оснащених вбудованими системами автоматизованого інтелектуального керування, із збереженням відносно низького рівня витрат. Це, у свою чергу, визначається досягненням оптимального співвідношення між вартістю виробу, якістю конструкції та комфортом його використання.

Отже, сучасні дослідження у галузі біомеханіки спрямовані на комплексне розв'язання проблем реабілітації осіб з інвалідністю верхніх і нижніх кінцівок, стабілізації постави та ходи шляхом розроблення функціональних високотехнологічних прототипів протезів і екзоскелетів із використанням

методів математичного та комп'ютерного моделювання складних систем, а також засобів системного аналізу, теорії стійкості та керування. У межах таких досліджень здійснюється вивчення кінематичних і динамічних характеристик оптимальних рухів прототипів з метою формування параметрів оптимізації їх функціональних властивостей, визначення умов раціональної механічної структури, стабілізації руху та розроблення ефективних алгоритмів інтелектуального керування.

### **1.3 Огляд наукових досліджень у сфері прикладної біомеханіки**

Науковими колективами [1, 2] активно та результативно здійснюються дослідження у межах зазначеної проблематики, зокрема в галузі аналізу динамічних систем на основі диференціальних [3, 4] та інтегральних рівнянь [5]. Зазначений напрям є фундаментальною складовою наукового пізнання, оскільки розуміння закономірностей складного руху кінематичних ланок, що виникають під час функціонування окремих частин тіла людини, є необхідною умовою для реалізації реалістичної реконструкції людського тіла та має визначальне значення для медичних і реабілітаційних застосувань. Для створення простого у використанні, маломасового та косметично привабливого протеза верхньої кінцівки необхідним є детальне дослідження природної руки людини та побудова її адекватної кінематичної моделі. Оскільки кінцівки людини являють собою складні багатоланкові механізми з великою кількістю ступенів свободи, моделі рук, ніг і кистей, що розробляються в межах даного проєкту, базуються на системах диференціальних рівнянь, які допускають як аналітичні, так і чисельні методи розв'язання. Такі моделі можуть слугувати надійною теоретичною та практичною основою для проєктування ефективних протезів кінцівок людини.

Окремий блок досліджень [6, 7, 8] присвячений нейрофізіологічним і біомедичним аспектам керування рухами людини. Зокрема, у роботах [9, 10] розглянуто статеві особливості мозкових процесів, пов'язаних із гальмуванням програм ручних рухів, а також зміни потужності електроенцефалографічних

сигналів під час рухів пальців руки з різними характеристиками альфа-ритму в контексті проблем здоров'я сучасної цивілізації. Подієві потенціали під час контр латерального перемикання рухових програм у людини досліджено у [11], регуляторні механізми у біосистемах — у [12], а активність м'язів верхньої кінцівки при патологіях нервово-м'язового проведення — у [13].

Важливе значення мають також дослідження подієвих потенціалів за умов перемикання та припинення програм ручних рухів, виконані відповідно у роботах [14, 15]. Функціональний стан опорно-рухового апарату сучасних школярів проаналізовано у [16], тоді як у працях [17, 18] досліджено коркові джерела електричної активності, пов'язані з припиненням підготовленої рухової реакції та перемиканням на альтернативні рухові програми. Поєднання результатів теоретичних і експериментальних досліджень із засобами комп'ютерного, імітаційного та математичного моделювання створює передумови для комплексного й всебічного аналізу окресленої проблематики.

Також реалізовано низку масштабних наукових проєктів [19, 20], спрямованих на вивчення складних робототехнічних і біотехнічних систем керування, зокрема на розроблення моделей для біомеханічного аналізу стійкої ходи людини та моделювання деформації стопи під час руху. У цих роботах широко застосовувався метод скінченних елементів для побудови чисельних моделей деформації стопи, що є важливим етапом у дослідженні її біомеханічних характеристик. У результаті було запропоновано вдосконалені методи прогнозування та оцінювання ризику травм, а також показників біомеханічної ефективності стопи при деформаціях. Отримані результати сприяли поглибленню розуміння механізмів виникнення патологічних режимів ходи, зокрема при вальгусній деформації стопи.

Роботи [21, 22] присвячені моделюванню біомеханічних систем і симуляційному аналізу прототипів, призначених для реабілітації осіб з обмеженими руховими можливостями нижніх кінцівок, і спрямовані на формування методичних рекомендацій щодо створення функціональних екзоскелетів [23]. Прототипи таких систем виготовлялися на основі попереднього теоретичного аналізу з метою перевірки достовірності

сформульованих припущень. У зазначених дослідженнях представлено різні підходи до опису рухів кінцівок людини: від моделей, що ґрунтуються на детальному урахуванні біомеханічної інформації та активності м'язів, до спрощених моделей, орієнтованих переважно на кінематичний аналіз без урахування повної динаміки тіла [24].

Особливо складною науковою проблемою є дослідження динаміки стійкості тіла людини в поєднанні зі складними рухами верхніх кінцівок, оскільки навіть опис відносно простих рухів характеризується високою складністю, що впливає на повторюваність і точність рухових актів. Це має принципове значення для медичних застосувань та проєктування реабілітаційних пристроїв [25]. У межах наведених робіт запропоновано схеми керування рухами людини та конструктивні рішення пристроїв, призначених для підтримки рухової активності осіб з обмеженими можливостями, насамперед верхніх кінцівок. З метою медичного застосування в зазначених дослідженнях також здійснюється моделювання реальних сигналів, характерних для здорової людини, що дає змогу відтворювати природні рухи тіла з високим ступенем достовірності.

#### **1.4 Постановка завдань на кваліфікаційну роботу**

Сучасні наукові дослідження зосереджені на розробленні та вдосконаленні методів вивчення характеристик і функціональних особливостей плечового комплексу, а також аналізі змін, пов'язаних із його руховою активністю.

Традиційно оцінювання стану плечового комплексу здійснюється з використанням рентгенографії, однак дана методика забезпечує лише двовимірне представлення анатомічних структур, що зумовлює втрату інформації щодо просторових ступенів свободи руху. Останнім часом для подолання зазначених обмежень застосовуються методи магнітно-резонансної томографії та флюороскопії, які дозволяють отримувати тривимірні проєкції кісткових структур і визначати положення та орієнтацію досліджуваних сегментів. Водночас ці діагностичні підходи пов'язані з використанням

іонізуючого випромінювання або сильних магнітних полів і, як правило, обмежуються проведенням переважно статичних вимірювань.

У зв'язку з цим актуальним напрямом сучасних досліджень є розроблення методів тривимірного аналізу, здатних подолати обмеження статичної оцінки та забезпечити можливість біомеханічного аналізу динаміки плечового комплексу, що сприяє поглибленню розуміння механізмів його руху. Найбільш поширеними в цьому контексті є електромагнітні та оптоелектронні вимірювальні системи, які дозволяють здійснювати високоточні, надійні та синхронні кінематичні вимірювання рухів плечової кістки, лопатки та ключиці. З метою уніфікації підходів до аналізу кінематики верхньої кінцівки Міжнародним товариством з біомеханіки були опубліковані рекомендації щодо визначення систем координат суглобів та опису обертальних рухів.

Останніми роками запропоновано низку методів оцінювання рухів лопатки, зокрема акроміальний метод та підхід картографування поверхні. Акроміальний метод ґрунтується на встановленні сенсорного елемента безпосередньо на акроміоні з подальшою оцифровкою опорної точки у вигляді тривимірних координат. На відміну від цього, метод картографування поверхні передбачає визначення рухів лопатки на основі аналізу просторового розташування серії маркерів, розміщених на поверхні над лопаткою.

Разом з тим, зазначені кінематичні методи мають низку обмежень, що було продемонстровано у роботах Леардіні та співавторів. Зокрема, маркер-орієнтовані підходи є чутливими до похибок, зумовлених неточністю розміщення маркерів, а також до впливу артефактів, пов'язаних із деформаціями м'яких тканин. У результаті валідність і надійність методів, заснованих на використанні маркерів для реєстрації рухів лопатки, можуть бути суттєво обмежені, що потребує подальшого вдосконалення методологічних підходів до біомеханічного аналізу плечового комплексу.

## РОЗДІЛ 2

### СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ПРОГРАМИ І МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОБОТАМИ

#### **2.1 Новітні методи реконструкції людського тіла та проектування роботів**

Реалістична реконструкція людського тіла, що може бути реалізована у процесі створення роботів-гуманоїдів, має істотне значення для широкого спектра міждисциплінарних наукових досліджень, зокрема у галузях робототехніки, медико-реабілітаційних наук, клінічної медицини, медико-біологічних застосувань, а також у сферах сервісу, освіти та індустрії розваг. Важливим науковим аспектом таких досліджень є поглиблене розуміння закономірностей складного руху кінематичних ланок, що виникають під час функціонування окремих частин людського тіла [26].

У цьому контексті особливої уваги потребує аналіз різноманітних динамічних моделей кінцівок людини, зокрема кисті, руки, ноги та системи постури, які застосовуються для створення віртуальних моделей і подальшого моделювання прототипів протезів, у тому числі інтелектуальних протезів з елементами адаптивного та інтелектуального керування. Розроблення віртуальних систем штучних кінцівок, здатних адекватно відтворювати рухи людських кінцівок, відкриває нові можливості для розв'язання низки актуальних завдань медичної реабілітації [27]. Для цього необхідним є системний аналіз існуючих моделей пальців, кисті та руки людини, які використовуються для імітації рухів кінцівок у роботах-гуманоїдах [28].

Створення механізованих систем штучного пальця та руки, що відтворюють функціональні й динамічні характеристики природної руки людини, може слугувати ефективною експериментальною платформою для навчально-дослідних цілей з перспективою подальшого застосування у вирішенні практичних задач медичної реабілітації осіб з інвалідністю [29].

Як приклад сучасного підходу до проектування таких систем доцільно розглянути використання концепцій і рішень, заснованих на проєктах з

відкритим програмно-апаратним кодом (Open Source Humanoid Robot). Зокрема, у межах проєкту InMoov Humanoid Robot (3D PRINTED LIFE SIZE ROBOT), реалізованого в Novia University of Applied Sciences (Фінляндія) (рис. 2.1), поєднано технології адитивного виробництва (3D-друку) та робототехніки. Такий підхід демонструє ефективність використання відкритих інженерних платформ для створення біоміметичних роботизованих систем, придатних для подальших наукових досліджень і практичних застосувань [30].



Рисунок 2.1 – Приклад проєкту відкритого коду [31]

На базі цієї розробки (рис. 1.1) роботи-гуманоїди створюються студентськими і учнівськими лабораторіями повсюди. Наприклад, схожого робота створила група студентів European Project Semester у Technobothnia у м. Ваазі (Фінляндія), адаптувавши його як робот-бібліотекар (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Робот-бібліотекар

## 2.2 Використання сучасних технологій для проектування роботів гуманоїдів

Більшість сучасних гуманоїдних роботів, представлених на ринку, характеризуються подібним набором функціональних можливостей. Основними з них є автономне переміщення у просторі з використанням систем навігації та уникнення перешкод, що забезпечує рух без постійного зовнішнього керування або контролю з боку оператора. Важливою складовою функціональності таких роботів є також здатність до взаємодії з людиною, зокрема розпізнавання мовлення, формування відповідей на запити та ведення діалогу [32, 33].

Показовим прикладом є гуманоїдний робот Nao, розроблений дослідницькою групою компанії SoftBank у 2008 році. Даний робот здатний здійснювати ходьбу, розпізнавати людей і об'єкти, здійснювати мовну комунікацію та взаємодіяти з користувачами. Інтегрована в систему Nao програма розпізнавання мовлення підтримує близько 20 мов, а програмний код має відкриту архітектуру, що сприяє його широкому використанню в науково-дослідних і навчальних цілях. Первинно робот Nao розглядався як засіб для роботи з дітьми з розладами аутистичного спектра, однак згодом сфера його застосування була розширена і включила функції асистента в галузі охорони здоров'я, роботу в інформаційно-довідкових службах, а також виконання ролі гіда [34, 35].

Іншим прикладом є гуманоїдний робот Romeo, створений у 2009 році як дослідницька платформа для тестування сервісних послуг, спрямованих на підтримку осіб похилого віку та людей з інвалідністю. Робот Romeo оснащений чотирма обчислювальними модулями, які забезпечують обробку зорової та слухової інформації, керування рухами, а також реалізацію алгоритмів штучного інтелекту. Завдяки цьому Romeo може виконувати функції персонального помічника у побутовому та соціальному середовищі.

Окрему увагу заслуговує гуманоїдний робот Pepper, розроблений компанією SoftBank у 2014 році, який орієнтований на виконання функцій піклувальника та соціального асистента. Pepper здатний адаптувати свою

поведінку до звичок і потреб користувача, забезпечуючи індивідуалізовану взаємодію. Основною функцією даного робота є надання інформаційної підтримки та навігаційних рекомендацій. Для цього Pepper оснащений системами розпізнавання мовлення та ведення діалогу, які підтримують до 15 мов, модулями розпізнавання людей і взаємодії з ними, інфрачервоними сенсорами, бамперами, інерціальним вимірювальним блоком, двовимірними та тривимірними камерами, а також ультразвуковими датчиками, що забезпечують всебічну автономну навігацію [36, 37]. Робот має висоту близько 120 см і характеризується ергономічним та безпечним дизайном, зокрема оснащений сенсорним екраном на передній панелі для відображення інформації та підтримки комунікації з користувачем (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Сучасні роботи-гуманоїди

У 2010 році фірма «Engineered Arts» створила робота-гуманоїда з характеристиками, які схожі на попередні моделі. Робот RoboThespian був створений, щоб бути вчителем чи актором. Його додаткова цінність – виразність міміки обличчя (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Вигляд DRC-HUBO та Robothespian

Гуманоїдний робот DRC-HUBO було створено у 2015 році з відмінною цільовою спрямованістю порівняно із сервісними гуманоїдами. Розробником виступила команда KAIST у межах програми DARPA Robotics Challenge, за результатами якої робот став переможцем змагань, орієнтованих на розвиток напівавтоматичних наземних робототехнічних систем, здатних виконувати складні завдання в небезпечних, техногенно сформованих середовищах. DRC-HUBO є адаптивною багатофункціональною роботизованою платформою, що має здатність трансформації: робот може переходити з режиму крокуючого пересування до режиму руху на чотирьох колесах шляхом згинання кінцівок і використання коліс, інтегрованих у колінні вузли. Наявність колісної компоненти забезпечує підвищення швидкості та стійкості переміщення, тоді як кінцівки зберігають можливість виконання просторових маневрів, зокрема підйому сходами, а також реалізації прикладних функцій, таких як керування транспортним засобом [38, 39].

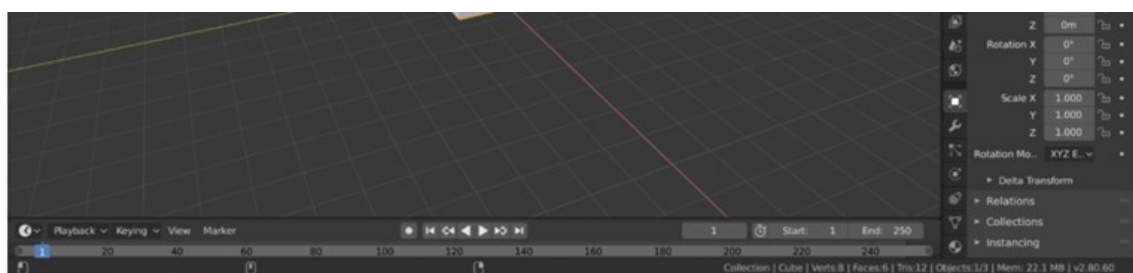
Для ефективного проектування сучасних роботизованих систем, зокрема роботів-гуманоїдів, доцільно враховувати низку взаємопов'язаних факторів, серед яких ключовими є послідовна оптимізація апаратної складової, удосконалення програмного забезпечення та забезпечення надійної інтеграції з

цифровими технологіями, зокрема із засобами віртуальної реальності (рис. 2.5). Окремого значення набуває оцінювання потенціалу застосування таких систем у медичній практиці, реабілітації, освіті та інформаційно-сервісних середовищах, що формує додаткові вимоги до функціональної безпеки, ергономіки взаємодії та адаптивності алгоритмів керування [40].

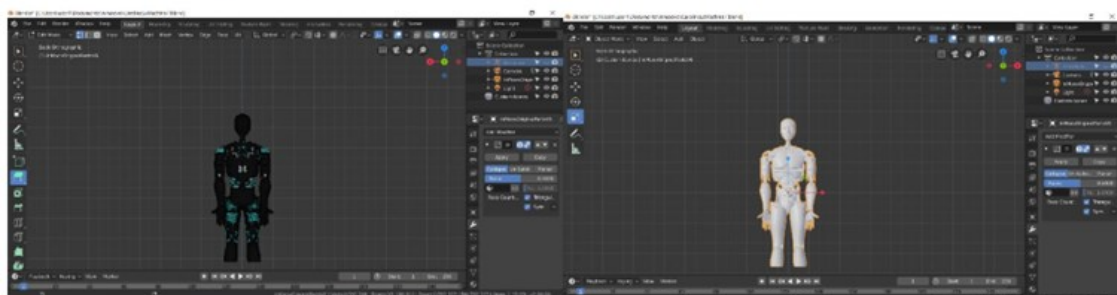
З метою реалізації прикладного сценарію використання гуманоїда у ролі, наприклад, робота-бібліотекаря, необхідно сформувати та реалізувати програмно-алгоритмічне забезпечення, яке включає:

- опис та синтез жестових і маніпуляційних рухів, що забезпечують захоплення і перенесення предметів;
- оптимізацію сенсорного забезпечення кисті, зокрема калібрування та налаштування датчиків тиску пальців для підвищення надійності захоплення та зменшення ризику пошкодження об'єктів маніпулювання.

Крім того, для забезпечення автономності функціонування роботизованої системи доцільним є перехід на автономне енергоживлення шляхом підключення акумуляторного модуля [41], а також інтеграція апаратного перемикача для спрощення процедур увімкнення та вимкнення робота в умовах експлуатації.



*Blender Enviroment*



*Detailed model display*

*Normal model display*

Рисунок 2.5 – Технології VR для ефективного проектування роботів

Дану технологію VR слід реалізувати для керування роботом за допомогою контролерів віртуальної реальності (VR). Це досягається шляхом встановлення зв'язку між Unreal Engine і Arduino. Робот моделюється у середовищі VR. Відповідно рухи, які виконуються за допомогою контролерів, візуально відображатимуть за допомогою VR.

### 2.3 Гуманоїдні сценарії

Сфери освіти та інформаційно-сервісного обслуговування є одними з найбільш перспективних напрямів застосування гуманоїдних роботів типу InMoov. Найбільш імовірними сценаріями їх використання можуть бути виконання функцій працівника аеропорту, екскурсовода (гіда), бібліотекаря або помічника вчителя. Економічна доцільність упровадження таких роботизованих систем обумовлюється можливістю безперервної роботи у цілодобовому режимі без вихідних, стабільністю виконання заданих алгоритмів поведінки та відсутністю емоційних факторів, що можуть впливати на якість обслуговування [42].

У сценарії функціонування гуманоїда в умовах аеропорту робот може виконувати завдання з надання довідкової інформації, перегляду та бронювання авіарейсів, а також відповідати на стандартні запити користувачів. Такі функції є переважно статичними та не потребують складної емоційної взаємодії, що добре узгоджується з функціональними можливостями гуманоїда InMoov. У цьому випадку робот може працювати стаціонарно, без необхідності активного пересування. Реалізація даного сценарію потребує додаткового апаратного забезпечення для зчитування ідентифікаторів рейсів і реалізації платіжних операцій. Зазначений режим експлуатації впливає на використання таких апаратних компонентів, як система відстеження руху очей, модулі голосового керування, пасивні інфрачервоні датчики (PIR), жестові інтерфейси та датчики тиску пальців.

Для реалізації сценарію гіда або провідника гуманоїдний робот повинен мати можливість пересування у просторі, що передбачає інтеграцію відповідного

мобільного функціоналу. У цьому випадку доцільним є використання антропоморфних жестів для вказування на об'єкти, будівлі або визначні місця. Гуманоїд може також здійснювати екскурсійний супровід, переміщуючись приміщеннями або відкритими просторами. Реалізація такого сценарію зумовлює підвищені вимоги до систем відстеження очей, голосового керування, PIR-датчиків та жестових механізмів [43].

Аналогічний набір функціональних вимог характерний і для сценарію використання гуманоїда в бібліотеці. У ролі бібліотекаря гуманоїд (рис. 2.6) може надавати інформацію про розташування літературних джерел, допомагати у пошуку необхідних книг, а також формувати рекомендації на основі аналізу раніше обраних або прочитаних видань. Реалізація даного сценарію потребує використання систем відстеження очей, модулів голосової взаємодії, PIR-датчиків, жестових механізмів і сенсорів тиску пальців для маніпулювання об'єктами.

Ще одним перспективним напрямом застосування гуманоїда є сценарій помічника вчителя або освітнього асистента. У такому випадку робот може виконувати функції нагляду за учнями під час навчального процесу або перерв, відповідати на запитання, а також стимулювати інтерес студентів до вивчення робототехніки та суміжних дисциплін. Адаптація гуманоїда до даного сценарію не потребує спеціалізованих апаратних компонентів, однак доцільною може бути інтеграція проєкційного обладнання для візуалізації навчального матеріалу. У межах цього сценарію необхідним є використання систем відстеження очей, голосового керування, PIR-датчиків, жестових інтерфейсів та, за потреби, мультимедійних засобів відображення інформації.



Рисунок 2.6 – Робот-бібліотекар

## РОЗДІЛ 3

### ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ ТА ПРОГРАМНО-АПАРATНОЇ ПЛАТФОРМИ

#### 3.1 Історія та основні характеристики програмної платформи Arduino

Платформа Arduino є відкритою апаратно-програмною мікроконтролерною системою, орієнтованою на простоту використання та швидке прототипування електронних і мехатронних пристроїв. Основною її перевагою є поєднання доступного апаратного забезпечення з інтуїтивно зрозумілим програмним середовищем, що робить Arduino придатною як для початківців, так і для досвідчених розробників.

Плати Arduino забезпечують можливість зчитування різноманітних вхідних сигналів – зокрема з сенсорів дотику, освітленості, температури або мережевих сервісів – та перетворення їх у керуючі дії, такі як активація виконавчих механізмів, керування індикаторами або передавання даних у мережу Інтернет.

Керування роботою плат Arduino здійснюється шляхом завантаження програмного коду, написаного мовою програмування Arduino, яка базується на мові C/C++, з використанням інтегрованого середовища розробки Arduino IDE. Такий підхід забезпечує достатню гнучкість реалізації алгоритмів керування та водночас знижує поріг входження для користувачів з мінімальним досвідом програмування.

Упродовж тривалого часу платформа Arduino використовується як керуючий елемент у широкому спектрі проєктів – від побутових і навчальних застосувань до складних інженерних і науково-дослідних рішень. Навколо цієї відкритої платформи сформувалася велика міжнародна спільнота розробників, до складу якої входять студенти, інженери, програмісти та науковці. Сукупний внесок цієї спільноти забезпечив накопичення значного обсягу відкритих знань, бібліотек та прикладних рішень, що суттєво полегшує процес навчання і розроблення нових систем.

Історично Arduino бере свій початок в Інституті інтерактивного дизайну Ivrea, де вона була створена як доступний інструмент швидкого прототипування для студентів, які не мали глибокої підготовки у сфері програмування та мікроелектроніки. Надалі платформа зазнала значної еволюції, адаптуючись до нових технічних вимог і сфер застосування. Сьогодні лінійка Arduino охоплює як прості 8-бітові мікроконтролерні плати, так і сучасні рішення, орієнтовані на застосування в системах Інтернету речей (IoT), адитивних технологіях, робототехніці та автоматизації.

Програмне забезпечення Arduino вирізняється зручністю для початківців і водночас достатньою гнучкістю для професійних розробників. Arduino IDE є кросплатформним середовищем і функціонує в різних операційних системах, що істотно розширює можливості його використання. У науковій та освітній практиці Arduino застосовується для створення бюджетних експериментальних установок і навчальних стендів, демонстрації фундаментальних принципів фізики, хімії, біології, робототехніки та мехатроніки. Крім того, дизайнери й митці використовують цю платформу для створення інтерактивних прототипів та мультимедійних інсталяцій.

На ринку існує значна кількість альтернативних мікроконтролерних платформ – Parallax Basic Stamp, BX-24 (Netmedia), Phidgets, Handyboard (MIT) та інші, які реалізують подібні функціональні можливості. Спільною рисою цих рішень є прагнення спростити процес програмування мікроконтролерів та зробити його доступним для широкого кола користувачів. Водночас платформа Arduino вирізняється оптимальним поєднанням вартості, відкритості та масштабованості.

До основних переваг платформи Arduino порівняно з іншими мікроконтролерними системами доцільно віднести:

- низьку вартість, оскільки плати Arduino є значно дешевшими за більшість аналогів, а окремі модифікації можуть бути виготовлені самостійно.
- кросплатформність, що забезпечує роботу програмного забезпечення Arduino IDE у різних операційних системах, на відміну від багатьох інших рішень, обмежених середовищем Windows.

- простоту використання, яка поєднує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс із можливістю реалізації складних алгоритмів керування.
- відкритість програмного забезпечення, що поширюється з відкритим вихідним кодом і може бути розширене за допомогою бібліотек C++, а за потреби — із переходом до програмування на мові AVR C.
- відкритість апаратної частини, яка ліцензується за умовами Creative Commons, що дає змогу модифікувати конструкцію плат, створювати власні апаратні рішення та глибше досліджувати принципи їх функціонування.

Таким чином, платформа Arduino є обґрунтованим вибором для реалізації програмно-апаратних систем керування в межах даної роботи, оскільки поєднує доступність, функціональну гнучкість, розвинену екосистему та широкі можливості інтеграції з сенсорними і виконавчими пристроями.

### 3.2 Архітектура та основні компоненти платформи

На рисунку 3.1 зображена плата Ардуіно, виділенням показані ті частини плати, з якими можливо взаємодіяти під час типового використання плати.

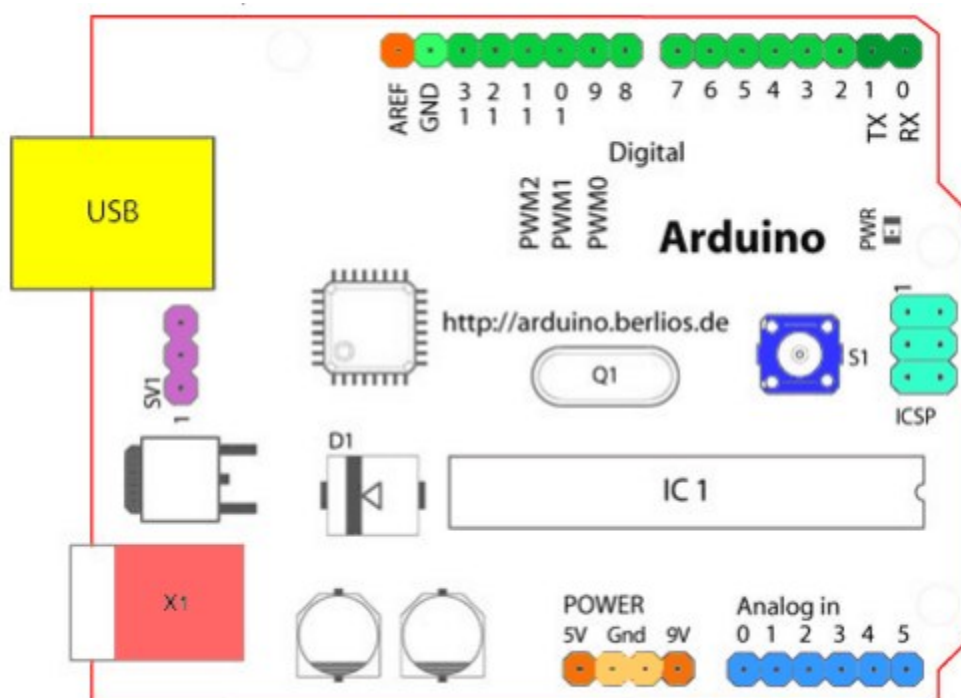


Рисунок 3.1 – Ардуіно УНО

Опис основних компонент наступний: аналоговий опорний контакт (помаранчевий колір), цифрова земля (світло-зелений), цифрові контакти 2–13 (зелені), цифрові контакти 0-1/Serial In/Out — TX/RX (темно-зелені). Ці контакти не можна використовувати для цифрового введення-виводу, якщо використовується послідовний зв'язок.

- кнопка скидання — S1 (синій);
- внутрішньо-схемний програматор (синьо-зелений);
- аналогові входи 0–5 (блакитні);
- контакти живлення та заземлення;
- вхід джерела живлення (9–12 В постійного струму) — X1 (рожевий);
- перемикач зовнішнього живлення та живлення USB – SV1 (фіолетовий)
- USB для послідовної зв'язки між платою та комп'ютером. Це може використовуватися для живлення плати (жовтий)

Характеристики мікроконтролерів Arduino наступні:

1. ATmega328P, що використовується на найновіших платах. Цей пристрій має параметри: контакти цифрового введення/виводу: 14 (з них 6 забезпечують вихід ШІМ), контакти аналогового входу: 6 (DIP) або 8 (SMD), постійний струм на контакт введення-виводу: 40 мА, флеш-пам'ять 32 КБ, SRAM 2 КБ; EEPROM 512 байт.
2. ATmega168 – Arduino Diecimila та ранніх версіях Duemilanove.  
Параметри пристрою – контакти цифрового введення/виводу: 14 (з них 6 забезпечують вихід ШІМ), контакти аналогового входу: 6 (DIP) або 8 (SMD), постійний струм на контакт введення-виводу: 40 мА, флеш-пам'ять 16 КБ, SRAM: 1 КБ, EEPROM: 512 байт.
3. ATmega8 для старих плат – контакти цифрового введення-виводу: 14 (з них 3 забезпечують вихід ШІМ), аналогові вхідні контакти: 6, постійний струм на контакт введення-виводу: 40 мА, флеш-пам'ять: 8 КБ, SRAM: 1 КБ, EEPROM: 512 байт.

Цифрові контакти на платі Arduino використовують для введення та виведення даних загального призначення за допомогою `digitalRead()`, `pinMode()` та `digitalWrite()`.

Кожен вихід має в собі внутрішній резистор, який можна увімкнути-вимикати за допомогою функції `digitalWrite()`. Максимальний струм на вихід становить 40 мА.

### **3.3 Переваги та обмеження використання Arduino для розробки роботизованих систем**

Програмно-апаратна платформа Arduino широко використовується у проектах робототехнічного спрямування різного рівня складності — від простих мобільних роботів з лінійною траєкторією руху до автономних роботизованих систем зі складними алгоритмами керування. Завдяки розвиненій екосистемі апаратних модулів і програмних інструментів Arduino є ефективним засобом реалізації роботизованих маніпуляторів, автономних мобільних роботів, роботів, що рухаються за лінією, а також систем зі стабілізацією положення та уникненням перешкод. Платформа також успішно застосовується для створення самобалансувальних роботів і роботів із сенсорними системами навігації.

Використання Arduino у робототехнічних проектах характеризується наявністю як суттєвих переваг, так і певних обмежень, які необхідно враховувати на етапі проектування роботизованих систем.

Переваги використання Arduino:

1. Низька вартість. Плати Arduino є відносно недорогими, особливо у порівнянні з одноплатними комп'ютерами Raspberry Pi, що робить їх доступними для студентів, дослідників і аматорів робототехніки.

2. Простота використання. Платформа вирізняється низьким порогом входження завдяки великій кількості навчальних матеріалів, прикладів коду та активній спільноті користувачів, представленій численними тематичними форумами.

3. Широкий вибір апаратних компонентів. Arduino підтримує значний спектр периферійних пристроїв, зокрема датчиків, двигунів, сервоприводів і виконавчих механізмів, що дозволяє реалізовувати різноманітні робототехнічні рішення.

4. Відкритий вихідний код. Платформа Arduino є відкритою, що забезпечує доступ до програмного коду та можливість його модифікації відповідно до вимог конкретного проєкту.

Недоліки використання Arduino:

1. Обмежена обчислювальна потужність. Мікроконтролери, що застосовуються у платах Arduino, мають порівняно низьку продуктивність, що може обмежувати реалізацію складних алгоритмів керування, обробки даних і штучного інтелекту.

2. Обмежений обсяг пам'яті. Невеликий обсяг оперативної та постійної пам'яті може стати критичним фактором при роботі з великими масивами даних або складними програмними структурами.

3. Відсутність офіційної технічної підтримки. Платформа не передбачає централізованої служби технічної підтримки, у зв'язку з чим користувачі змушені покладатися на спільноту розробників, онлайн-форуми та навчальні ресурси.

Таким чином, Arduino доцільно використовувати для навчальних, дослідницьких і прототипних робототехнічних систем, де пріоритетами є простота реалізації, низька вартість і швидке впровадження. Водночас для розробки високопродуктивних або інтелектуально складних роботизованих комплексів платформа Arduino може потребувати інтеграції з більш потужними обчислювальними засобами або використання альтернативних апаратних рішень.

### **3.4 Опис мови програмування Arduino та огляд популярних середовищ розробки**

Мова програмування Arduino є високорівневою мовою, створеною на основі C/C++, яка орієнтована на спрощення процесу програмування мікроконтролерів і реалізації алгоритмів керування апаратними пристроями. Вона забезпечує доступ до апаратних ресурсів мікроконтролера через стандартизовані бібліотеки та абстракції, що дозволяє розробникам зосередитися

на логіці функціонування системи, не заглиблюючись у низькорівневі апаратні деталі. Завдяки цьому мова Arduino широко використовується у навчальних, дослідницьких і прикладних проєктах робототехніки, автоматики та вбудованих систем.

На сучасному етапі існує декілька інтегрованих середовищ розробки (IDE), призначених для створення програмного забезпечення для платформ Arduino.

#### 1. Arduino IDE версії 1.8.x.

Arduino IDE 1.8.x є класичним і найбільш тривалий час використовуваним середовищем розробки, яке протягом багатьох років вважалося стандартом для програмування плат Arduino. Після виходу нової версії Arduino IDE 2.x дана редакція формально розглядається як застаріла (рисунок 3.2), однак це не свідчить про її функціональну непридатність або припинення підтримки. Навпаки, Arduino IDE 1.8.x і надалі залишається однією з найпопулярніших середовищ розробки завдяки стабільності, простоті інтерфейсу та широкій підтримці з боку спільноти. Саме ці характеристики роблять її особливо зручною для початківців, незважаючи на менш сучасний вигляд порівняно з новішими інструментами.

#### 2. Arduino IDE версії 2.0.x.

Arduino IDE 2.0.x є сучасним середовищем розробки, офіційно представленим у 2021 році, яке суттєво розширює функціональні можливості попередніх версій (рисунок 3.3). Дана редакція включає вбудований відладчик, хоча його можливості значною мірою обмежені апаратними характеристиками підтримуваних мікроконтролерів. Крім того, середовище забезпечує автодоповнення коду, покращену навігацію між кількома файлами проєкту, розширені інструменти аналізу коду та більш сучасний графічний інтерфейс. У сукупності ці особливості підвищують зручність і ефективність розробки складніших програмних рішень для робототехнічних і вбудованих систем.

Таким чином, вибір конкретного середовища розробки Arduino залежить від рівня підготовки розробника та складності поставлених завдань. Arduino IDE 1.8.x доцільно використовувати для навчальних і простих прикладних проєктів, тоді як Arduino IDE 2.0.x є більш придатною для розробки комплексних систем,

що потребують покращених інструментів налагодження та організації програмного коду.

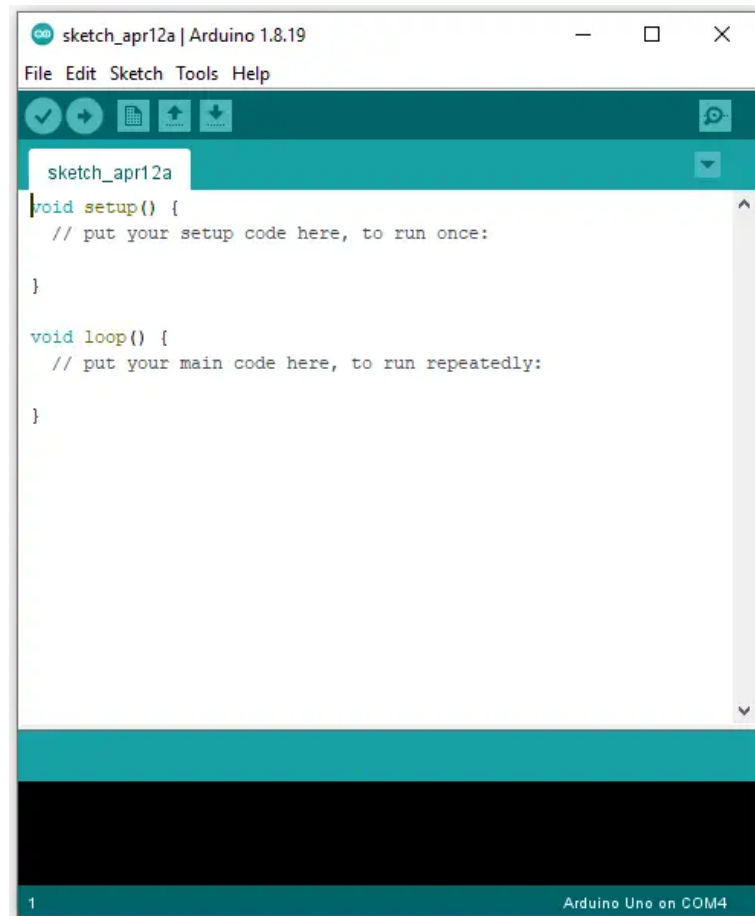


Рисунок 3.2 – Класична Arduino IDE

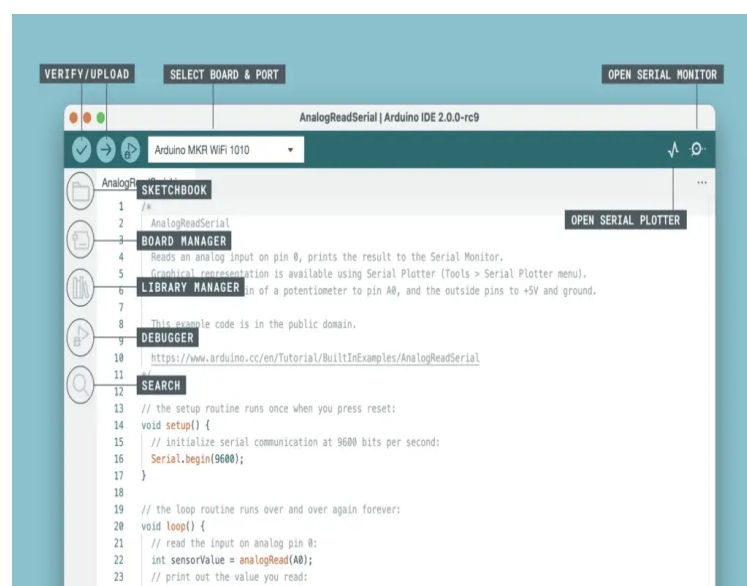


Рисунок 3.3 – Нова IDE Arduino V2.0.x

Зараз спрямовані на розвиток цього нового продукту, виправлення помилок та проблем, а також додавання нових функцій.

Отже, можливо, в майбутньому відбудуться деякі серйозні зміни в Arduino IDE v2, які повністю витіснять IDE v1.8.x.

### 3. Веб-редактор Arduino.

Веб-редактор Arduino (рис. 3.4) – це онлайн-середовище розробки Arduino. Він має такі ж функції, можливості з автономними IDE Arduino.

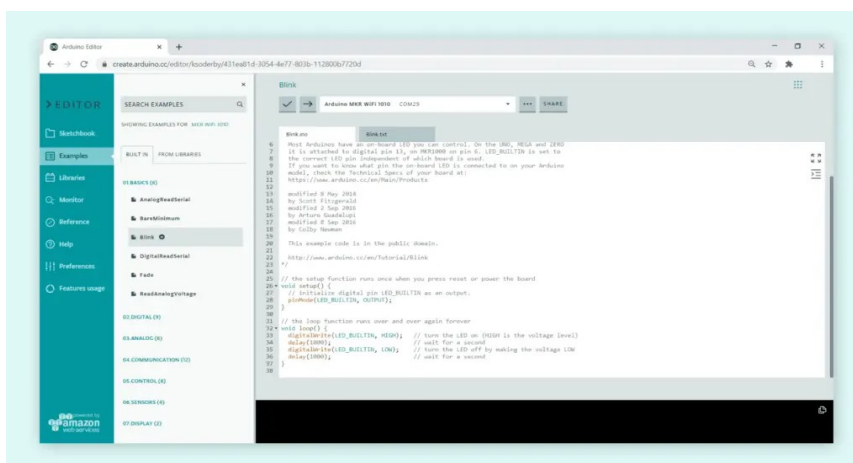


Рисунок 3.4 – Веб-редактор Arduino

## 3.5 Аналіз переваг та обмежень платформи Arduino для розробки роботизованих систем

Під час розроблення роботизованих систем на базі платформи Arduino необхідним є детальний аналіз особливостей взаємодії мікроконтролера з датчиками, виконавчими механізмами та драйверами, а також чітке розрізнення їх типів і режимів застосування. Це зумовлено тим, що ефективність і надійність функціонування роботизованої системи безпосередньо залежать від коректного вибору та інтеграції апаратних компонентів.

Датчик являє собою електронний пристрій, призначений для перетворення фізичної величини або сигналу у відповідний електричний сигнал, який може бути аналоговим або цифровим. Більшість фізичних величин у природі мають аналоговий характер, тому основним завданням датчиків є перетворення цих величин у електричні сигнали, придатні для подальшої обробки

мікроконтролером. У робототехнічних і електронних проєктах на базі Arduino може використовуватися широкий спектр сенсорних пристроїв, зокрема датчики освітленості, температури, вологості та опадів, датчики руху, відстані та виявлення об'єктів, інерційні вимірні модулі (IMU), медичні та біометричні датчики, сенсори хімічних газів, а також датчики сили, вигину та ваги. Така різноманітність сенсорів дозволяє формувати повну інформаційну картину про стан навколишнього середовища та внутрішні параметри роботизованої системи.

Актуатор – виконавчий механізм, що є пристроєм, призначеним для перетворення електричної енергії в інші види енергії, зокрема механічну, теплову, світлову або звукову, з метою зміни фізичного стану об'єкта чи середовища. До типових актуаторів, що застосовуються у робототехнічних системах, належать світлові елементи (світлодіоди), акустичні пристрої, електродвигуни різних типів (двигуни постійного струму, сервоприводи, крокові двигуни), соленоїди та електромагнітні клапани, реле й контактори, електромагніти, а також нагрівальні й охолоджувальні елементи. Виконавчі механізми забезпечують реалізацію активних дій робота у фізичному середовищі та формують його функціональні можливості.

Слід зазначити, що більшість приводів і актуаторів є навантаженнями з підвищеним енергоспоживанням і для своєї роботи потребують значних значень електричного струму. При цьому максимальний струм, який може безпечно забезпечити цифровий вивід мікроконтролера Arduino, зазвичай не перевищує 20–25 мА, що є недостатнім для безпосереднього керування більшістю електродвигунів або силових виконавчих механізмів. З цієї причини пряме підключення, наприклад, двигуна постійного струму з номінальним струмом 1 А до виходу Arduino є неможливим.

Для розв'язання цієї проблеми використовуються спеціальні проміжні пристрої – драйвери, які забезпечують керування потужними навантаженнями за допомогою низькопотужних керуючих сигналів мікроконтролера. Драйвери можуть реалізовуватися як у вигляді простих схем на основі біполярних або польових транзисторів, так і у формі спеціалізованих модулів, призначених для

конкретних типів навантажень. До таких пристроїв належать H-мости для керування двигунами постійного струму, електронні регулятори швидкості (ESC) для безщіткових двигунів, драйвери крокових двигунів, модулі керування RGB-світлодіодними стрічками, інверторні мости для систем із синхронними двигунами та перетворювачами, а також підсилювачі потужності для акустичних систем.

У робототехнічних застосуваннях платформа Arduino найчастіше використовується для керування електродвигунами, зчитування сигналів із датчиків і управління виконавчими механізмами. Зокрема, двигуни, що відповідають за рух робота або його маніпуляційні дії, зазвичай керуються за допомогою сигналів широтно-імпульсної модуляції (ШИМ), які формуються мікроконтролером Arduino. Датчики, у свою чергу, забезпечують збирання інформації про зміни у навколишньому середовищі та стан самої системи, на основі чого реалізується логіка керування поведінкою робота.

Таким чином, використання мікроконтролерної платформи Arduino є доцільним для побудови роботизованих систем, оскільки вона забезпечує можливість інтеграції широкого спектра периферійних пристроїв, сенсорів і виконавчих механізмів у єдину керуючу систему. Саме універсальність, гнучкість, доступність і розвинена екосистема апаратних та програмних засобів зумовлюють широке застосування Arduino у галузі робототехніки та обґрунтовують вибір даної платформи для реалізації представленого бакалаврського проєкту.

### **3.6 Використання методів прикладного наукового дослідження**

У межах виконання кваліфікаційної роботи застосовано комплексний підхід до наукового дослідження, який поєднує експериментальні методики з теоретичними дослідженнями та аналітичним опрацюванням наявних наукових матеріалів. Дослідження ґрунтується як на результатах, отриманих іншими авторами та опублікованих у відповідних наукових джерелах, що були проаналізовані в процесі виконання роботи, так і на власному практичному

досвіді автора, набутому під час індивідуальної науково-дослідної діяльності та проходження виробничої практики. Важливу роль у роботі відіграють методи комп'ютерного моделювання, проектування та системного аналізу отриманих результатів.

Необхідні симуляційні дослідження виконано з використанням програмних засобів платформи Arduino та відповідного спеціалізованого програмного забезпечення з метою отримання розрахункових рішень, проведення динамічного аналізу та побудови тривимірної динамічної моделі кінцівки людини. Така модель використовується для оцінювання м'язових зусиль, що виникають під час виконання вільних рухів. Програмні симуляції та випробування застосовуються для вимірювання динамічних характеристик кінцівки та суглобів пальців у процесі багаторазового згинання і розгинання.

Перевірка та верифікація контролера, який використовується для моделювання динаміки рухів кінцівок, м'язів і суглобів, здійснюється на основі експериментальних досліджень із застосуванням заявленого програмно-апаратного забезпечення на базі Arduino. При цьому цільові значення, що відповідають положенням рівноваги, отримано з реальних модельних експериментів, які імітують процеси руху людини в реальному часі за допомогою спеціалізованого пристрою типу «контролер-рукавичка».

Розроблювана експериментальна установка будується з урахуванням концепції існуючих модельних структур руки людини та адаптується залежно від специфіки дослідницької мети керування. Однією з основних цілей є визначення методів моделювання, необхідних для ідентифікації функціональних особливостей центральної нервової системи, координації імітаторів м'язів руки та пальців, а також аналізу принципів їх взаємодії під час виконання рухових завдань. Іншою важливою метою є дослідження впливу вихідних сигналів центральної нервової системи на м'язи з метою координації одно- та багатосуглобних рухів, а також аналіз ролі каналів зворотного зв'язку у процесах керування, що дозволяє глибше зрозуміти властивості цілісної нейро-опорно-рухової системи.

Аналіз динамічного процесу функціонування руки робота-гуманоїда як об'єкта керування базується на розробленні функціональної схеми автоматизованої системи керування, обґрунтованому виборі технічних засобів автоматизації, проектуванні принципових електричних схем, виконанні техніко-економічного обґрунтування та визначенні перспектив практичного

Сфера застосування апаратно-програмної науково-дослідної демонстраційної установки охоплює проведення навчальних і прикладних експериментів, а в подальшому — використання отриманих результатів для розроблення та вдосконалення реабілітаційних технологій. У перспективі розвитку даного дослідження створену модельну установку доцільно використовувати для симуляції динаміки протезів, аналізу та оптимізації алгоритмів керування, оцінювання стійкості їх функціонування. Це, у свою чергу, може сприяти створенню більш ергономічних і комфортних протезних рішень, а також допомогти медичним фахівцям у підборі оптимального типу протеза для пацієнтів із порушеннями функцій опорно-рухового апарату.

Розроблювана експериментальна платформа реалізує такий основний функціонал:

#### 1. Біомеханічні експериментальні випробування.

Установка може використовуватися як сучасний експериментальний стенд для проведення біомеханічних досліджень у навчально-наукових цілях. За її допомогою можуть виконуватися підготовчі роботи та експериментальні випробування, збирання й аналіз експериментальних даних, проведення теоретичних досліджень із застосуванням заявлених технологій у різних умовах, перевірочні тести розроблених стратегій керування, формування висновків за результатами досліджень, презентація отриманих результатів і підготовка наукових публікацій. Крім того, установка передбачає опрацювання необхідної технічної документації, планування експериментів, складання електричних і функціональних схем, а також підготовку проміжних і підсумкових звітів.

#### 2. Аналіз біомеханічних даних.

Попередні експериментальні дані використовуються для формування наближених референтних значень, необхідних для налаштування контролера, а

також для отримання реальних кінематичних параметрів руху. Це дозволяє визначити опорні траєкторії для системи керування, що відповідають комфортній та фізіологічно природній позі руки людини.

3. Прототипування смарт-протезів з інтелектуальною компонентою керування.

У подальшому розвитку експериментальна установка може бути використана як база для створення прототипів смарт-протезів і протезних комплексів з інтелектуальними системами керування. Біомеханічні моделі кінцівок, зокрема руки людини, мають важливе значення для вирішення біомедичних і клінічних задач. Незважаючи на наявність на ринку різних типів протезів, значна частина з них залишається надто дорогою, складною в експлуатації або недостатньо зручною для користувачів. Тому для створення якісного та ергономічного протеза необхідним є глибоке вивчення природної моделі кінцівки з метою забезпечення комфорту, функціональності та підвищення рівня прийняття таких пристроїв пацієнтами.

4. Вивчення динамічних ефектів природних рухів.

Запропонована установка забезпечує можливість детального дослідження динамічних ефектів рухів руки та пальців. З огляду на складність моделювання та проектування штучних біосистем, таких як рука людини, на базі установки здійснюється розроблення адекватних моделей біологічного керування. Адекватність таких моделей визначається їх здатністю досягати поставленої наукової або інженерної мети. Установка дозволяє детально аналізувати рухові процеси, оскільки для повноцінного вивчення руху необхідно розуміти координацію роботи м'язів, що забезпечує поглиблене уявлення про поведінку системи під час виконання конкретних рухових завдань або їх класів.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СМАРТ-РУКИ РОБОТА НА ПЛАТФОРМІ ARDUINO

#### 4.1 Проєктування та розробка апаратної частини установки

Розробка руки робота-гуманоїда у межах даного проєкту здійснюється на основі концепції відкритого програмно-апаратного проєкту OpenSource Humanoid Robot, зокрема з використанням напрацювань проєкту 3D PRINTED LIFE SIZE ROBOT – InMoov Humanoid Robot, реалізованого в Novia University of Applied Sciences (Фінляндія). Вказаний підхід передбачає інтеграцію технологій адитивного виробництва (3D-друку) з сучасними засобами робототехніки та автоматизації, що забезпечує гнучкість, модульність і масштабованість конструкції.

На базі даної відкритої розробки гуманоїдні робототехнічні системи створюються в освітніх і науково-дослідних лабораторіях по всьому світу. Зокрема, прикладом практичної реалізації є адаптація робота групою студентів European Project Semester у лабораторному комплексі Technobothnia (м. Вааса, Фінляндія), де гуманоїд був модифікований відповідно до сценарію використання у ролі робота-бібліотекаря.

Завдання практичної частини проєкту зі створення науково-дослідної демонстраційної установки імітатора-аватара руки робота-гуманоїда передбачає не лише відтворення базової конструкції OpenSource Humanoid Robot, а й її подальшу оптимізацію та функціональне вдосконалення. У цьому контексті Луцький національний технічний університет орієнтується на сучасні тенденції розвитку наукових досліджень, долучилися до зазначеної міжнародної ініціативи.

У межах даної розробки з метою підвищення функціональності гуманоїдної руки передбачається удосконалення програмного забезпечення на базі платформи Arduino. Зокрема, програмний код потребує модифікації для реалізації можливості індивідуального керування кожним пальцем, що є

необхідною умовою для імітації складних маніпуляційних рухів, характерних для природної руки людини.

Тривимірний модель руки виготовляється з використанням 3D-принтера, після чого до неї інтегруються інші елементи установки, необхідні для забезпечення повноцінного функціонування системи. Апаратна частина установки передбачає використання поворотних виконавчих механізмів (сервоприводів), пристроїв комутації та взаємодії із сенсорними системами, зокрема з датчиком руху Microsoft Kinect, а також зовнішнього інтерфейсу керування на базі планшетного комп'ютера (типу NuVision або аналогічного), що забезпечує зручний доступ до системи керування Arduino.

## **4.2 Особливості процесу проєктування**

Процес проєктування демонстраційної установки імітатора руки робота-гуманоїда здійснюється відповідно до структурованої методології, що включає послідовні етапи аналізу, синтезу та верифікації апаратних і програмних рішень. Основні принципи та логіка побудови установки відображені у відповідних структурних, функціональних і принципівих схемах, а також ілюстративних матеріалах, наведених на рисунках 4.1–4.10.

Зазначені схеми відображають архітектуру апаратної частини системи, взаємозв'язки між сенсорними модулями, виконавчими механізмами та керуючим мікроконтролером, а також алгоритмічну структуру системи керування. Такий підхід забезпечує системність проєктування, можливість поетапної перевірки працездатності окремих підсистем і створює передумови для подальшого розширення та модернізації розроблюваної установки відповідно до поставлених науково-дослідних і прикладних завдань.

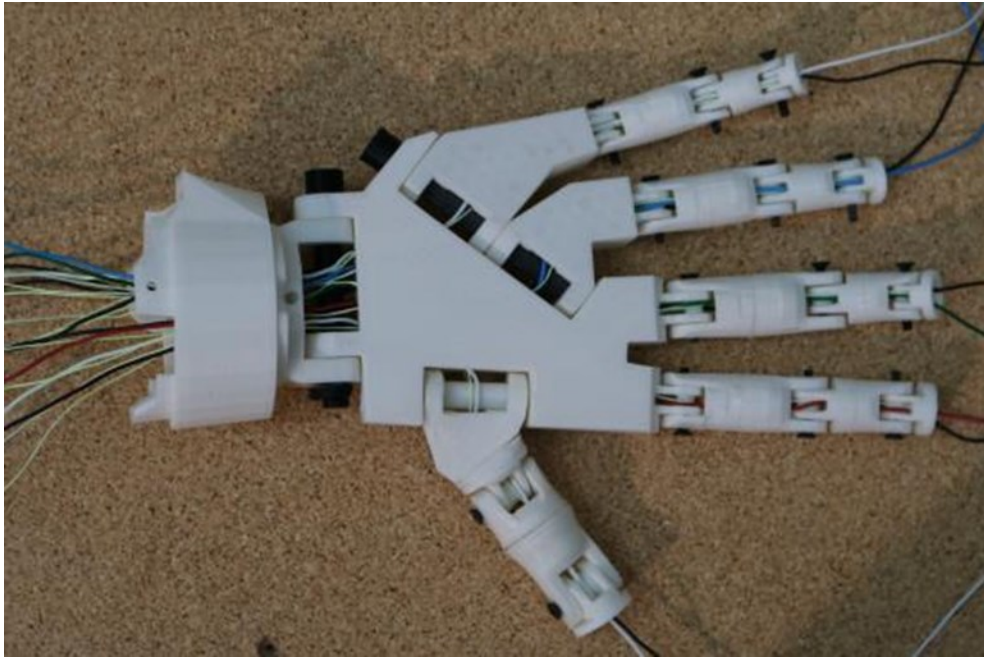


Рисунок 4.1 – Проектування руки



Рисунок 4.2 – Розробка пальців

На рисунку 4.5 показано вигляд руки робота з модулем керування у вигляді рукавиці з набором сенсорів.

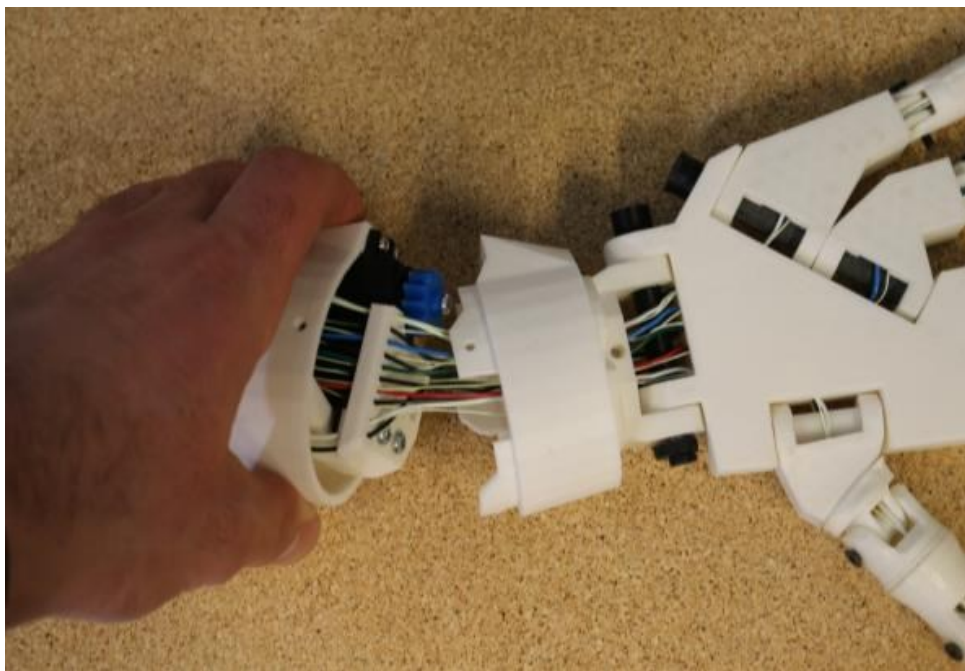


Рисунок 4.3 – Додавання зап'ястя до руки

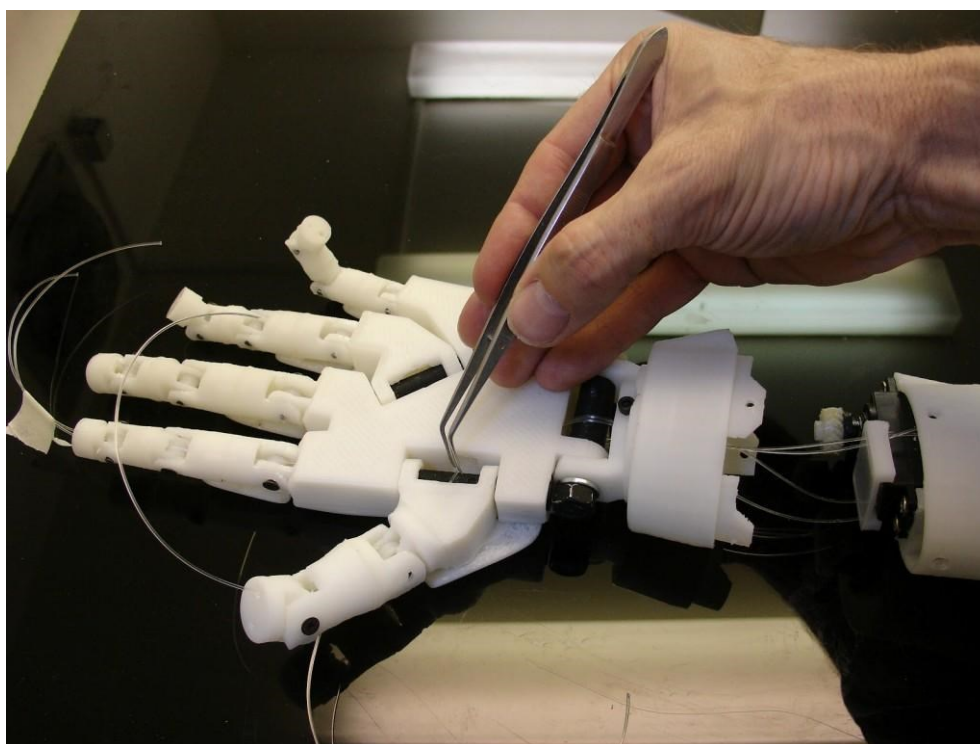


Рисунок 4.4 – Сервоприводи пальців

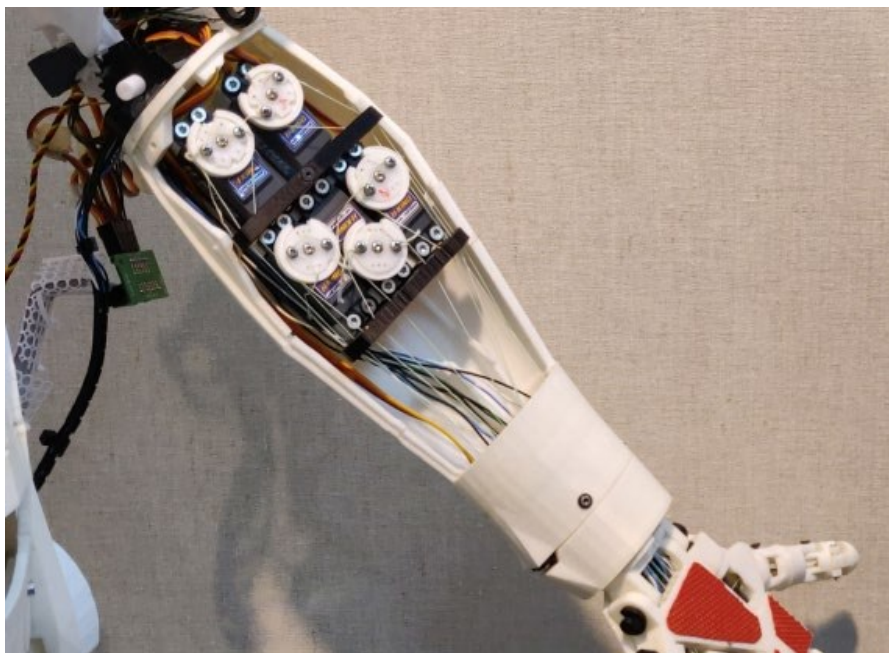


Рисунок 4.5 – Вид руки робота-гуманоїда з модулем керування



Рисунок 4.6 – Керована рука

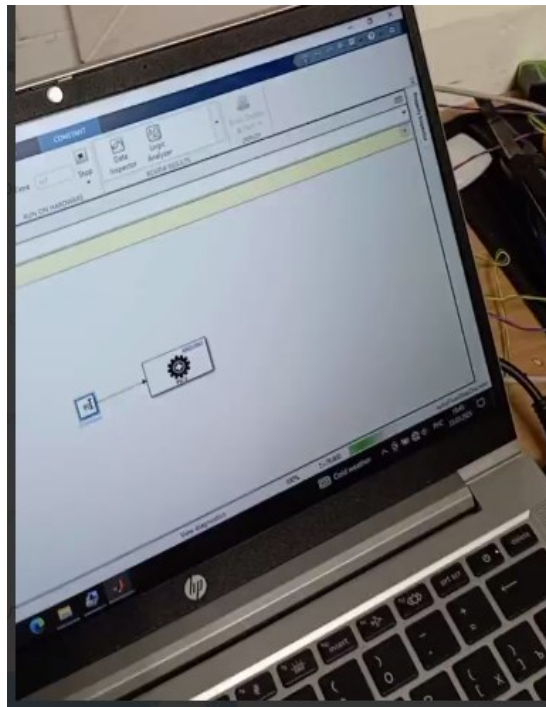


Рисунок 4.7 – Панель комп'ютерного керування



Рисунок 4.8 – Функціонал пальців

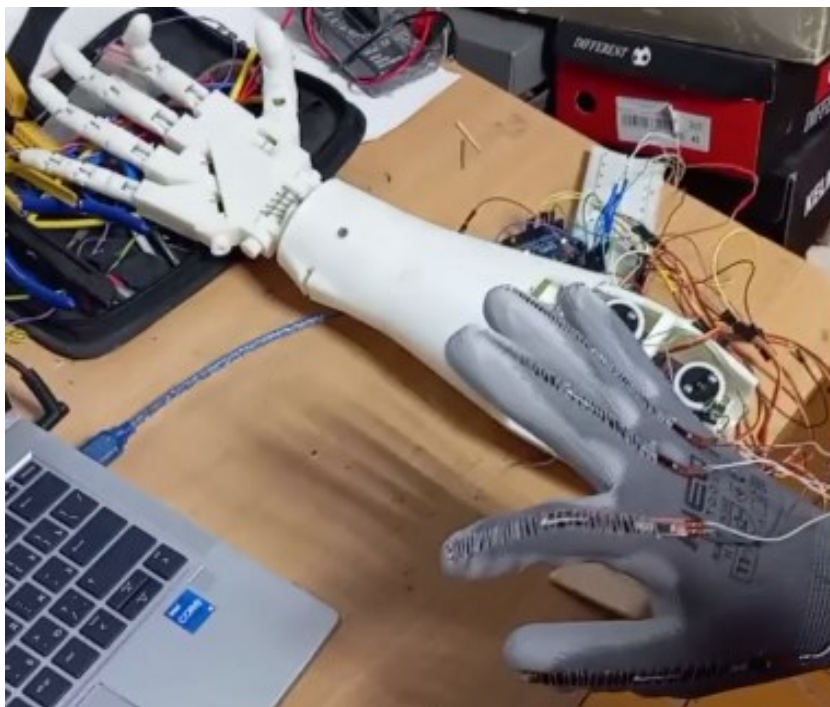


Рисунок 4.9 – Керований згин пальців

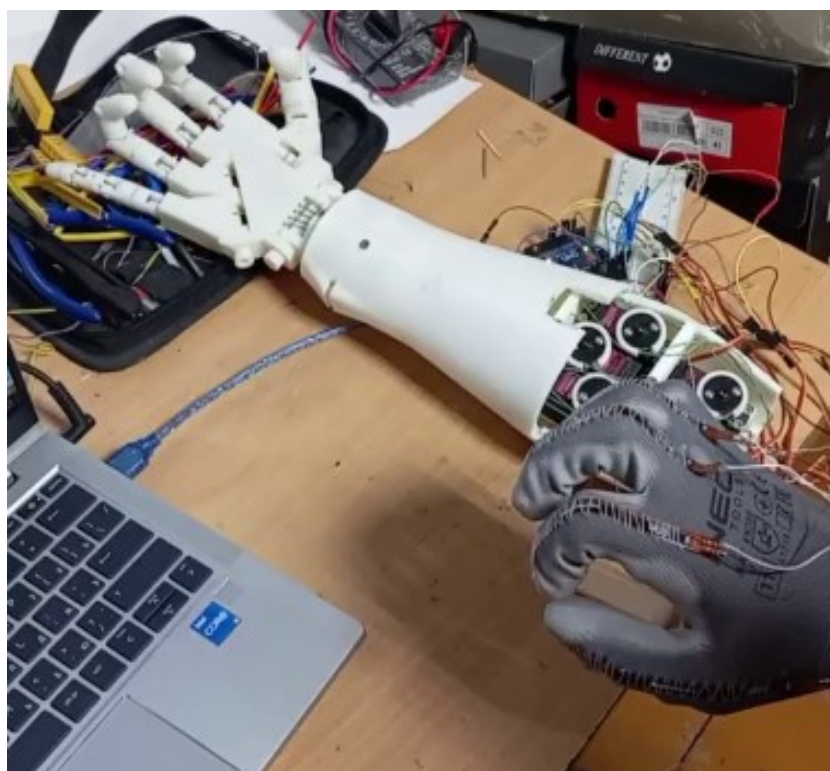


Рисунок 4.10 – Керований згин долоні

### 4.3 Реалізація процесу створення механізованої руки робота-гуманоїда

Основними структурними компонентами розроблюваної роботизованої системи є механізована рука робота-гуманоїда, сервоприводи, керуюча платформа Arduino, рукавичка як елемент пристрою керування, а також сенсорні елементи зчитування рухів пальців. Зазначені компоненти утворюють єдиний програмно-апаратний комплекс, що забезпечує імітацію рухів природної руки людини в режимі реального часу.

Рукавичка керування оснащується датчиками гнучкості, які реалізовані у вигляді змінних резисторів, електричний опір яких змінюється залежно від кута згину. Датчики встановлюються на пальцях рукавички та інтегруються у схему подільника напруги, де з одного боку використовується змінний резистор (датчик гнучкості), а з іншого — резистор із фіксованим номіналом. У процесі згинання пальців відбувається зміна вихідної напруги подільника, яка зчитується аналоговими входами мікроконтролера Arduino.

Отримані з датчиків значення напруги обробляються програмним забезпеченням контролера та перетворюються у відповідні керуючі сигнали для сервоприводів. Сервоприводи приводять у рух тягові елементи (струни), що виконують функцію штучних сухожилів і передають зусилля на пальці механізованої руки. Така кінематична схема забезпечує відтворення згинально-розгинальних рухів пальців і дозволяє реалізувати інтуїтивне керування механізованою рукою за принципом прямого біомеханічного відображення рухів оператора (рис. 4.11).

Застосований підхід до реалізації системи керування поєднує простоту апаратної реалізації з достатньою функціональністю, що робить розроблювану установку придатною для навчально-наукових експериментів, дослідження принципів біомеханічного керування та подальшого розвитку у напрямі створення інтелектуальних протезних і роботизованих систем.

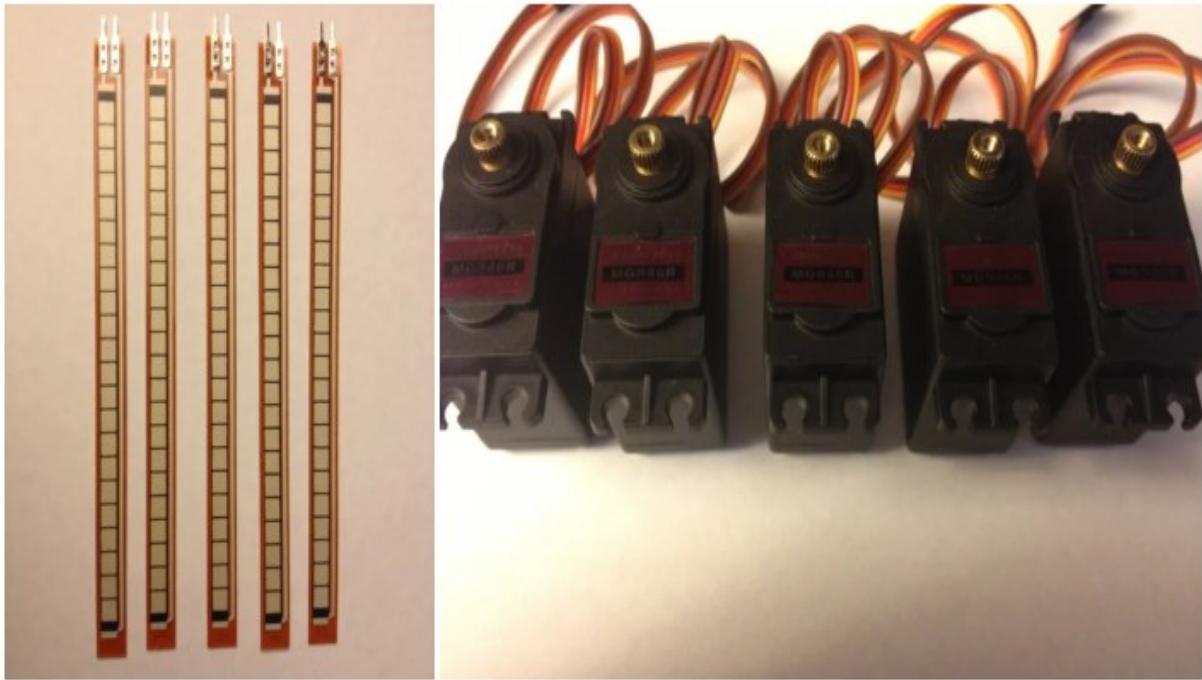


Рисунок 4.11 – Необхідні виробничі матеріали

Реалізація процесу створення руки робота-гуманоїда здійснюється згідно наступних етапів.

Етап 1. Підготовка матеріалів і збірка конструкції.

Перелік необхідних матеріалів (рис. 4.11) наступний: 5 сервоприводів MG946R (або еквівалент - MG995 або MG996), 5 шт. 4,5-дюймових гнучких датчиків, одна установка Arduino Uno, п'ять резисторів ємністю 22к, батарея 6,0-7,2 В (для сервоприводів), маленька макетна дошка, стандартний роз'єм акумулятора Татіуа, перемички макетної плати-провід підключення.

Етап 2. Розрукування на 3D-принтері частин руки (рис. 4.12).



Рисунок 4.12 – Роздрукування деталей

Рука, що використовується в межах даного проєкту, є складовою частиною відкритого програмно-апаратного проєкту InMoov, який містить набір конструктивних елементів, призначених для формування антропоморфних сегментів тіла робота. Загальна тривалість 3D-друку комплекту деталей руки, залежно від обраної роздільної здатності та параметрів друку, становить орієнтовно 15 годин. З метою забезпечення належної точності виготовлення та мінімізації небажаних сил тертя, друк елементів пальців здійснювався у стандартній або підвищеній роздільній здатності, що дозволяє підвищити якість поверхонь тертя та покращити кінематичну узгодженість рухомих вузлів.

#### **4.4 Створення електричної схеми гнучких сенсорів**

Для коректного застосування гнучких сенсорів у складі системи керування необхідною є розробка електричної схеми їх підключення, сумісної з мікроконтролерною платформою Arduino. Гнучкі датчики (сенсори) у даній

системі реалізовані як змінні резистори, електричний опір яких змінюється залежно від величини згину. Для перетворення зміни опору в сигнал, придатний для зчитування мікроконтролером, застосовується схема подільника напруги.

Принцип дії подільника напруги полягає у формуванні вихідної напруги на вузлі між двома послідовно з'єднаними резистивними елементами: гнучким датчиком (змінним резистором) та резистором із фіксованим номіналом. У процесі згинання сенсора змінюється його опір, що, відповідно до закону Ома та співвідношень для подільника напруги, призводить до зміни напруги на контрольній точці між резисторами. Сформований таким чином аналоговий сигнал зчитується аналоговими входами Arduino, після чого програмно обробляється і перетворюється у керуючі дії для виконавчих механізмів.

Розроблена схема підключення передбачає стандартну для Arduino структуру електроживлення та комутації: позитивний полюс джерела напруги позначено червоним кольором, негативний — чорним, тоді як сигнальна лінія (комутатор), підключена до аналогового входу Arduino, відображена синім кольором. Така схема забезпечує стабільне та повторюване зчитування сигналів з гнучких сенсорів і є необхідною умовою для реалізації достовірного біомеханічного керування механізованою рукою робота-гуманоїда.

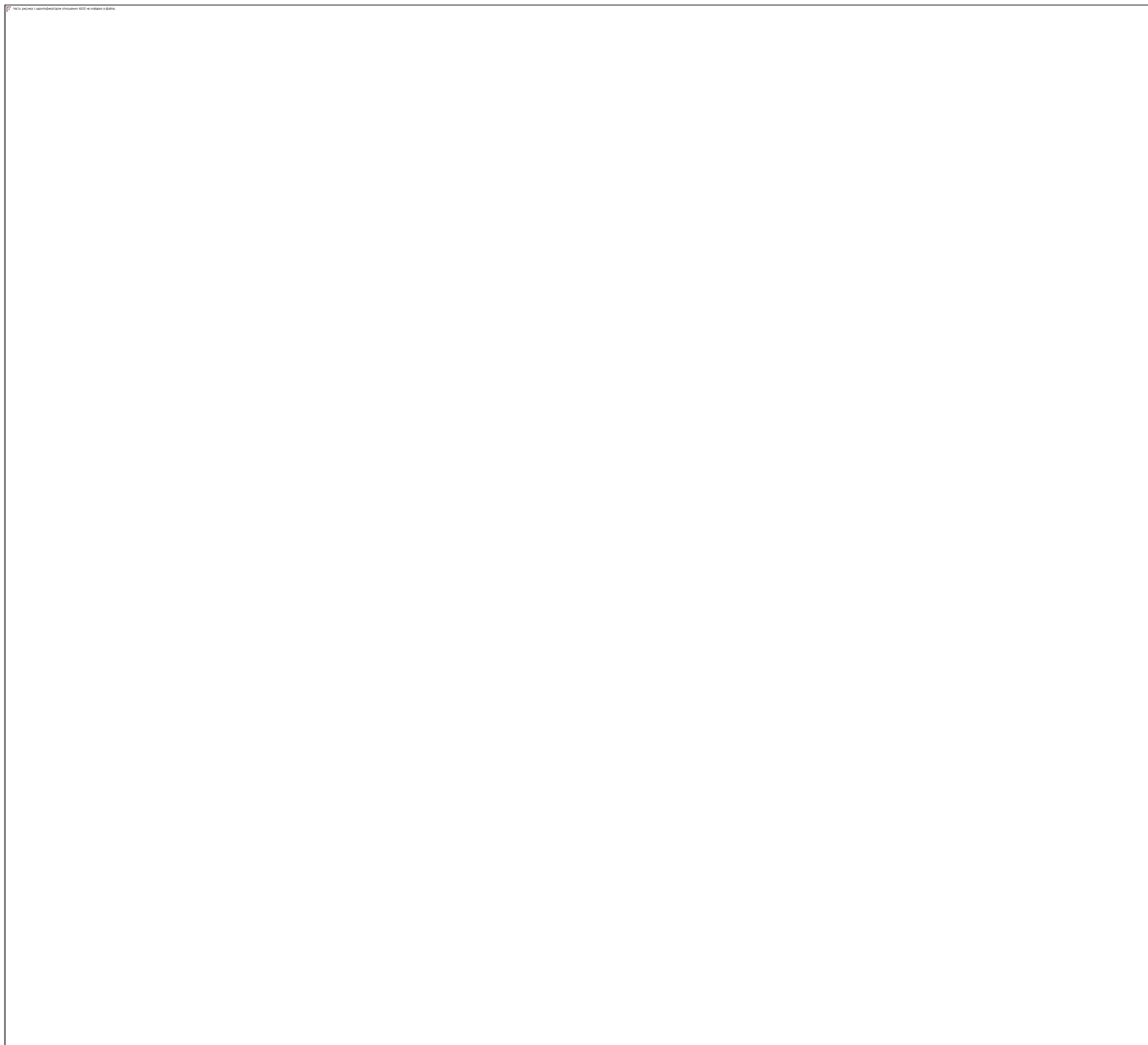


Рисунок 4.13 – Схема з'єднань

Резистори, що використовуються у схемі підключення гнучких сенсорів, мають номінальний опір 20 кОм. Загальний провід заземлення, до якого під'єднуються всі окремі заземлювальні проводи від датчиків, з'єднується з відповідним контактом GND плати Arduino. Напряга живлення +5 В, що подається з Arduino, підключається до загальної шини живлення схеми, тоді як сигнальні проводи від кожного датчика (позначені синім кольором) підключаються до окремих аналогових входів мікроконтролера.

Електрична схема гнучких сенсорів реалізується шляхом припаювання компонентів на компактну друковану плату типу RadioShack, конструкція якої дозволяє зручно та надійно закріпити її безпосередньо на рукавичці. Проводи також припаюються до сенсорів, після чого місця пайки додатково ізолюються

за допомогою термоусадкових трубок з метою запобігання коротким замиканням і механічним пошкодженням контактів. Подальша ізоляція зони підключення датчиків ізоляційною стрічкою забезпечує стабілізацію сенсорів у місцях їх найбільшої механічної вразливості, зокрема біля основи, де вони схильні до надмірного згинання. Застосування стрічки дозволяє обмежити критичні деформації та підвищити довговічність датчиків у процесі експлуатації.

#### **4.5 Встановлення і монтаж модуля керування рукою**

На початковому етапі виконується остаточна зшивка рукавички, після чого здійснюється монтаж гнучких сенсорів і відповідних електричних схем. Для цього у пластиковій основі кожного датчика, у верхній частині, де завершується резистивний шар, обережно свердлиться невеликий отвір. При виконанні цієї операції особливу увагу приділяють тому, щоб не пошкодити резистивний матеріал сенсора.

Далі рукавичку надягають на руку оператора та щільно фіксують. На кожному пальці за допомогою олівця або ручки наносять контрольні мітки у проекції суглобів, що дозволяє точно визначити оптимальні місця розташування датчиків. Після цього наконечники сенсорів пришивають до кожного пальця в зоні, розташованій дещо вище нігтьової фаланги, використовуючи попередньо підготовлені отвори. Уздовж кожного пальця нитка обмотується навколо датчика над двома суглобами, забезпечуючи можливість вільного ковзання сенсора під час згинально-розгинальних рухів. Після надійної фіксації всіх сенсорів друковану плату зі схемою щільно пришивають до області зап'ястя рукавички.

Наступним етапом є механічна збірка руки робота-гуманоїда. Під час монтажу пальців необхідно ретельно контролювати правильність орієнтації деталей перед їх склеюванням. Особливу увагу приділяють 3-міліметровим гвинтам, які виконують функцію шарнірних штифтів: вони не повинні створювати додаткове тертя під час руху. Для фіксації та зменшення люфтів допускається застосування гарячого клею на зовнішніх поверхнях пальців.

Перед встановленням струн доцільно дочекатися повного затвердіння клею та переконатися у коректній роботі сервоприводів.

На першому етапі налагодження здійснюється перевірка сервоприводів, які встановлюються на передпліччі механізованої руки. Для їх підключення до джерела живлення та плати Arduino використовується безпаяна макетна плата. Усі позитивні проводи сервоприводів (червоного кольору) під'єднуються до однієї шини живлення, тоді як негативні проводи (чорного або коричневого кольору) — до іншої. При цьому негативна шина макетної плати обов'язково з'єднується із загальним заземленням Arduino, а всі заземлювальні точки в системі повинні бути електрично об'єднані для забезпечення коректної роботи.

На другому етапі розробляється та завантажується відповідна керуюча програма на базі Arduino. Після перевірки правильності всіх електричних з'єднань рукавичку надягають на руку оператора та подають живлення на систему. У нормальному режимі роботи сервоприводи повинні відтворювати рухи пальців відповідно до ступеня їх згинання. На цьому етапі здійснюється калібрування вхідних сигналів датчиків, а також налаштування робочих діапазонів у програмному коді з метою досягнення оптимальної чутливості та стабільності керування. У разі некоректної роботи сервоприводів виконується повторна перевірка електричних з'єднань і програмних параметрів.

Завершальним етапом є встановлення та калібрування струн, що виконують роль штучних сухожилів. Цей процес є найбільш складним і відповідальним у межах усього проєкту. Струни фіксуються на сервоприводах за допомогою гарячого клею, який зручно застосовувати на етапі індивідуального налаштування кожного пальця. Для калібрування необхідно підключити Arduino та акумулятор живлення сервоприводів, запустити програму та, надягнувши рукавичку, зігнути відповідний палець. Шків сервоприводу регулюється таким чином, щоб отвір для струни був розташований максимально близько до пальців.

Спочатку натягується «розслаблююча» струна до максимально можливого рівня без згинання пальця, після чого вона фіксується у відповідному отворі кільця сервоприводу. Далі палець випрямляється, друга струна протягується через інший отвір і також надійно закріплюється. Аналогічні дії повторюються

для кожного пальця, при цьому особливу увагу приділяють рівномірності та достатній натягнутості всіх струн, що є необхідною умовою коректного та синхронного функціонування механізованої руки.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання даної кваліфікаційної роботи магістра було отримано можливість ґрунтовно ознайомитися з науково-дослідною та практичною задачею розробки руки робота, її структурою, матеріально-технічною базою та організацією робочих процесів. Особливу увагу було приділено вивченню науково-практичних і наукових установок, що функціонують на базі кафедри прикладної механіки та мехатроніки і використовуються для проведення досліджень і підготовки фахівців у галузі мехатроніки та робототехніки.

У процесі реалізації даної роботи було закріплено теоретичні знання, отримані під час навчання та набуто цінного практичного досвіду. Зокрема, здійснено детальне вивчення принципів функціонування автоматизованих робототехнічних і біомеханічних систем, а також проведено оцінювання їх ефективності з точки зору практичного застосування.

Робота над проєктом сприяла формуванню нових професійних компетенцій у сфері робототехніки та мехатроніки, а також дозволила розробити практичні наукові рекомендації, спрямовані на підвищення ефективності науково-освітньої діяльності кафедри.

У межах виконання кваліфікаційної роботи було досягнуто таких результатів:

- опановано методи виготовлення прототипів кінцівок і окремих частин тіла робота-гуманоїда та проаналізовано можливі напрями їх застосування у різних галузях науки і техніки;
- досліджено можливості використання програмно-апаратної платформи Arduino для керування елементами біомеханічних систем, а також вивчено принципи руху й системи контролю рухів роботів-гуманоїдів;
- розроблено та реалізовано експериментальну установку смарт-руки робота-гуманоїда з елементами інтелектуального керування.

У процесі виконання кваліфікаційної роботи забезпечено продуктивну взаємодію з науково-педагогічними працівниками кафедри, що сприяло поглибленню теоретичних знань і набуттю практичного досвіду. Було детально

вивчено функціонування установок на базі Arduino та приклади реалізації біомеханічних систем, а також проаналізовано принципи їх роботи.

Моделювання кінцівок людини є необхідним, оскільки її нормальні фізіологічні рухи супроводжуються складними динамічними процесами, а рука людини являє собою багатоступеневий механізм зі значною кількістю ступенів свободи. Розроблені та досліджені в межах проєкту моделі рук і кистей ґрунтуються на аналізі кінематики та динаміки рухів і можуть бути використані як науково-методична основа для подальшої розробки роботів-гуманоїдів, а також смарт-протезів верхніх кінцівок людини з інтелектуальними системами керування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A.D.Kuo, An optimal control model for analyzing human postural balance, - IEEE Transactions on biomedical engineering. Vol.42. №1, 2005. Pp.87-102.
2. Masaki Oshita and Akifumi Makinouchi A Dynamic Motion Control Technique for Human-like Articulated Figures EUROGRAPHICS 2001 / A. Chalmers and T.-M. Rhyne (Guest Editors), Volume 20, 2021. №3.
3. Jerzy Mrozowski, Jan Awrejcewicz Changes in the gait characteristics caused by external load, ground slope and velocity variation. Commun Nonlinear Sci Numer Simulat 16, 2021. Pp. 2313–2318.
4. Taku Komura, Yoshihisa Shinagawa and Tosiyasu L. Kunii Calculation and Visualization of the Dynamic Ability of the Human Body THE JOURNAL OF VISUALIZATION AND COMPUTER ANIMATION J. Visual. Comput. Animat. 10, 2020. Pp. 57–78.
5. POVSTIANOI O., MARKINA L., DENYSIUK V., LAPCHENKO Y., SATSYK V., PYLYPETS M. AUTOMATED SMART HUMANOID ROBOT ARM ON THE ARDUINO PLATFORM V. 129, Issue 4. 2025, P.43-53. <https://doi.org/10.7862/tiam.2025.4.4>
6. Jerzy Mrozowski, Jan Awrejcewicz, Piotr Bammerski. Analysis of stability of the human gait. Journal of theoretical and applied mechanics 45 (1), 2021, pp. 91-98.
7. Korzhyk O., Morenko O., Morenko A., Kotsan I. Gender features of brain processes during inhibition of manual movements' program. Annals of Neurosciences. 2019. Vol. 26, No 1. P. 4–9. <https://doi.org/10.5214/ans.0972.7531.260103> Scopus (Q3), Web of Science/
8. Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до оформлення кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти всіх освітніх програм денної та заочної форм навчання / уклад. Н.В. Ковальчук, Ю.Г. Фесіна, І.Л.Заблоцька Луцьк : ЛНТУ, 2023. 46 с.

9. Інноваційні підходи в підготовці магістрів з прикладної механіки : навч. посіб. / Т. Є. Божко, Б. П. Валецький, Л. М. Самчук, Т. І. Четвержук. Луцьк : Вежа-Друк, 2024. – 324 с.

10. Методичні рекомендації до написання кваліфікаційної роботи за ступенем вищої освіти «магістр» : метод. рекомендації для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньої програми «Прикладна механіка», спец. 131 Прикладна механіка, галузі знань 13 Механічна інженерія денної та заоч. форм навч. / уклад.: Т. І. Четвержук, Р. М. Полінкевич. Луцьк: ЛНТУ, 2024. 48 с.

11. Дмитрієв Д.О. Кінетостатичний аналіз каркасних компоновок верстатів з механізмами паралельної структури // Науковий журнал "Технологічні комплекси" №2, 2020. С. 40=45.

12. Борозенець Г.М., Павлов В.М., Семак І. В. Деталі машин : Навчальний посібник. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2021. 220 с.

13. Головня В.Д. САПР технологічних процесів : конспект лекцій / В.Д. Головня. Житомир : Житомирська політехніка, 2019. 200 с.

14. Morenko A., Morenko O., Dmytrotsa O., Poruchynsky A., Korzhyk O. Changes in electroencephalogram (EEG) power during subdominant (left) hand finger movements in females with different alpha rhythm characteristics. Health Problems of Civilization. 2020. Vol 14, No 1. P. 63–69. 15. <https://doi.org/10.5114/hpc.2020.93295> [Web of Science/](#)

15. Korzhyk O. V., Dmytrotsa O. R., Poruchynskyi A. I., Morenko A. H. Event-related potentials during contralateral switching over motor programs in humans. Regulatory Mechanisms in Biosystems. 2020. Vol. 11, No 1. P. 110–115. <https://doi.org/10.15421/022016> Scopus (Q4), Web of Science.

16. Чех О., Моренко О., Титюк О., Коржик О., Моренко А. ЕМГ – активність м'язів верхньої кінцівки людини при патології нервово-м'язового проведення. Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Біологічні науки. 2019. № 4(388). С. 168–178. <https://doi.org/10.29038/2617-4723-2019-388-4-168-178>

17. Korzhyk O., Morenko A., Poruchynskiy A., Dmytrotsa O. Event-Related Potentials under Condition of Switching over of the Programs of Manual Movements in Humans. NEURONUS 2020 IBRO Neuroscience Forum (December 8-11 2020). Online, 2020.

18. Korzhyk O., Morenko A. Event-related potentials under conditions of cessation of the motor programs in humans. FENS Regional Meeting: Book of Abstracts (Krakow, August 25-27 2021). Krakow, 2021. P.182.

19. Дмитроца О. Р., Коржик О. В., Журавльов О. А. Функціональний стан опорно-рухового апарату сучасних школярів. Перспективи розвитку фізичної культури і спорту у закладах освіти : матеріали Всеукр. онлайн наук. конф. з міжнародною участю (м. Луцьк, 19-20 травня 2022 р.). Луцьк, 2022. С. 52-54.

20. Korzhyk O., Morenko A. Cortical sources of electrical activity, related to the cessation of a prepared motor reaction in humans. Acta Neurobiologiae Experimentalis NEURONUS 2022. 2022. P. LXXXIII (85). Scopus, Web of Science <https://ane.pl/index.php/ane/issue/view/260>

21. Korzhyk O., Morenko A. Cortical sources of electrical activity, related to the switching to an alternative motor program in humans. Acta Neurobiologiae Experimentalis. VIth International Congress of the Polish Neuroscience Society (Torun, 20-23.09.2023). 2023. Vol. 83, No Supl 1. P. 91-92. <https://ane.pl/index.php/ane/issue/archive> Scopus (Q3), Web of Science Core Collection

22. Коржик О. В., Моренко А. Г., Дмитроца О. Р. Статеві особливості викликаної активності кори головноо мозку за умов зупинки запущеної моторної програми мануального руху. Фізіологічний журнал (НАН України, Інститут фізіології ім. О. О. Богомольця, 25-27 липня 2022 р.). 2022. Т. 68, № 3S. С. 55. Scopus.

23. Cyr, K. M., Segal, A. D., Neptune, R. R., & Klute, G. K. Biomechanical responses of individuals with transtibial amputation stepping on a coronally uneven and unpredictable surface. Journal of Biomechanics. 2023. Vol. 155. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2023.111622.

24. The Evolution of Prosthetic Limbs. URL: <https://www.sutori.com/en/story/the-evolution-of-prosthetic-limbs-WHf39iforVcK1V7rueghYRxN> (Last accessed: 10.06.2024).
25. Bertelson, S., Molina, L., Neptune, R. R., Djurdjanovic, D. System-based monitoring of muscular fatigue in lower-extremity movement. Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society. 2023. Vol. 15. No. 1. P. 1–9. DOI: 10.36001/phmconf.2023.v15i1.3551.
26. Panhelleux, B., Shalhoub, J., Silverman, A. K., McGregor, A. H. A review of through-knee amputation. *Vascular*. 2022. Vol. 30. No. 6. P. 1149-1159 DOI: 10.1177/17085381211045183.
27. Crouch, D. L., Hall, P. T., Stubbs, C., Stephenson, S. M., Anderson, D. E. Feasibility of implanting a foot–ankle endoprosthesis within skin in a rabbit model of transtibial amputation. *Bioengineering*. 2022. Vol. 9. No. 8. P. 348. DOI:10.3390/bioengineering9080348.
28. Hall, P. T., Bratcher, S. Z., Stubbs, C., Anderson, D. E., Crouch, D. L. Fully Implanted Prostheses for Musculoskeletal Limb Reconstruction After Amputation: An In Vivo Feasibility Study. *Annals of Biomedical Engineering*. 2021. Vol. 49. No.3. P. 1012-1021. DOI:10.1007/s10439-021-02741-z.
29. Kowalski, N., Zhu, X., Crouch, D. L. Using the Intact Human Hand to Benchmark Real-Time Myoelectric Control Performance for Robotic Interfaces. Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS. 2021. P. 6524-6527.
30. Hussain Z., Azlan N. Z. 3-D Dynamic Modeling and Validation of Human Arm for Torque Determination During Eating Activity Using Kane’s Method // *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 44(3). DOI:10.1007/s40997-019-00299-8.
28. Davoudabadi Farahani S., Svinin M., Andersen M. S., de Zee M., Rasmussen J. Prediction of closed-chain human arm dynamics in a crank-rotation task // *Journal of Biomechanics*. 2020. Vol. 49(13). P. 2684–2693. DOI:10.1016/j.jbio-mech.2016.05.034.

29. Lemieux P. O., Tétreault P., Hagemeister N., Nuno N. Influence of prosthetic humeral head size and medial offset on the mechanics of the shoulder with cuff tear arthropathy: A numerical study // *Journal of Biomechanics*. 2023. Vol. 46(4). P. 806–812. DOI:10.1016/j.jbiomech.2012.11.021.
30. Ali N., Andersen M.S., Rasmussen J., Robertson D.G.E., Rouhi, G. The application of musculoskeletal modeling to investigate gender bias in non-contact ACL injury rate during single-leg landings / *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*. 2024. Vol. 17(14). P. 1602-1616.
31. Rasmussen J., Torholm S., de Zee M. Computational analysis of the influence of seat pan inclination and friction on muscle activity and spinal joint forces // *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2020. Vol. 39(1). P. 52-57. DOI:10.1016/j.ergon.2008.07.008
32. Rasmussen J., Holmberg L.J., Sorensen K., Kwan M., Andersen M.S., de Zee M. Performance optimization by Musculoskeletal simulation / *Mov. Sport Sci. – 2022*. Vol. 1(75). P. 73–83.
33. Ariff F. H. M., Rambely A. S., Ghani N. A. A.Shoulder’s modeling via Kane’s method: Determination of torques in smash activity // *IFMBE Proceedings*. - 2021. Vol. 35(6). P. 207-209. DOI:10.1007/978-3-642-21729-6\_55.
34. Murphy M. A., Sunnerhagen K. S., Johnels B., Willén, C. Three-dimensional kinematic motion analysis of a daily activity drinking from a glass: A pilot study // *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2023. Vol. 3. P. 1-11. DOI:10.1186/1743-0003-3-18.
35. E.K. Chadwick, D. Blana, J. D. Simera, J. Lambrecht, S. P. Kim, A. S. Cornwell, D. M. Taylor, L.R. Hochberg, J. P. Donoghue and R. F. Kirsch. “Continuous neuronal ensemble control of simulated arm reaching by a human with tetraplegia”. *J. Neural Eng.* 8 (2021) 034003 (7pp) doi:10.1088/1741-2560/8/3/034003.
36. Chadwick, Blana, Kirsch & van den Bogert (2024) Real-Time Simulation of Three-Dimensional Shoulder Girdle and Arm Dynamics. *IEEE TBME*, In press. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6755458](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6755458).
37. Kuo, A. (2025). An optimal control model for analyzing human postural balance, *IEEE Transactions on biomedical engineering*. Vol.4. №1, Jan.2025.

38. Golliday, C. and Hemami, H. (1995). Postural stability of the two-degree of-freedom biped by general linear feedback, IEEE Transactions on biomedical engineering, Vol.42, No 1, 2025.
39. Grzelczyk, D., Biesiacki, P., Mrozowski, J. and Awrejcewicz, J. (2021). A 3-link model of a human for simulating a fall in forward direction, In book: Dynamical Systems in Applications.
40. Grzelczyk, D., Szymanowska, O. and Awrejcewicz, J. (2021). Kinematic and dynamic simulation of an octopod robot controlled by different central pattern generators, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I. Journal of Systems and Control Engineering.
41. Kuo, A. (2021). An optimal control model for analyzing human postural balance, IEEE Transactions on biomedical engineering, Vol.42, №1, 1995.
42. Langevin, G. (2022, January). How to create gestures for InMoov. Retrieved March 25, 2019, <http://inmoov.fr/how-to-create-gestures-for-inmoov/>
43. Obertyukh, R., Slabkyi A., Polishchuk, L., Povstianoi, O., Kumargazhanova, S., & Satymbekov, M. (2022). DYNAMIC AND MATHEMATICAL MODELS OF THE HYDROIMPULSIVE VIBRO-CUTTING DEVICE WITH A PRESSURE PULSE GENERATOR BULT INTO THE RING SPRING. Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska, 12(3), 54–58.
44. Halchuk T. N., Povstyanoy O. Yu., Bembenek M., Redko R. G., Chetverzhuk T. I., Polinkevych R. M. (2023). Impact of technological system's characteristics on the machining accuracy of bearing rings. Journal of Engineering Sciences, Vol. 10(1), pp. A22-A30, doi:10.21272/jes.2023.10(1). a4

# ДОДАТКИ

## Програмний код

```

#include <Servo.h> // Library needed to use function for servomotors

Servo ServoThumb, ServoIndex,      // Viene assegnato un nome a ciascun
servomotore.
ServoMiddle, ServoAnnular, ServoPinky;

byte startPackage; // Variable that will contain the character of start package set in the
GloveTX sketch, "<"

int AngThumb  = 0; // Variables with the values for the servomotors (between 0 and
180)
int AngIndex  = 0;
int AngMiddle = 0;
int AngAnnular = 0;
int AngPinky  = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Serial communication is activated at 9600 baud/s.

  ServoThumb.attach(9); // The servomotors are assigned to the pins of the Arduino
UNO board.
  delay(300); // A delay of 300ms is set for a secure connection (this can be
optional)
  ServoIndex.attach(8);
  delay(300);
  ServoMiddle.attach(7);
  delay(300);
  ServoAnnular.attach(6);
  delay(300);
  ServoPinky.attach(5);
  delay(300);

  Serial.println("Ready to receive.");
}

void loop()
{
  if(Serial.available()) { // Witing for data incoming from the other XBee module

```

```

Serial.println("The XBees are connected each other.");
  startPackage = Serial.read(); // The first value will be "<", the other are assigned
to the finger
  AngThumb = Serial.read();
  AngIndex = Serial.read();
  AngMiddle = Serial.read();
  AngAnnular = Serial.read();
  AngPinky = Serial.read();
  if(startPackage == '<'){ // Verifying that the first value is "<"
    Serial.println("I'm receiving analog signals:"); // If you are seeing this in the
Serial Monitor you have correctly received data
    if(AngThumb!=255) // Sometimes the incoming value goes to 255, I couldn't
discover yet the reason, so I simply excluded it when it happens. You can remove this
line for every finger if you don't have this kind of problem
      ServoThumb.write(AngThumb); // The servomotors rotates of the assigned
degrees

    if(AngIndex!=255)
      ServoIndex.write(AngIndex);

    if(AngMiddle!=255)
      ServoMiddle.write(AngMiddle);

    if(AngAnnular!=255)
      ServoAnnular.write(AngAnnular);

    if(AngPinky!=255)
      ServoPinky.write(AngPinky);
    Serial.print(AngThumb);
Serial.print(" | ");
Serial.print(AngIndex);
Serial.print(" | ");
Serial.print(AngMiddle);
Serial.print(" | ");
Serial.print(AngAnnular);
Serial.print(" | ");
Serial.println(AngPinky);
    }
  }
  delay(100); // a delay to make the servomotors working correctly (a lower value
could make the system not working, higher value make it slower)
}

```

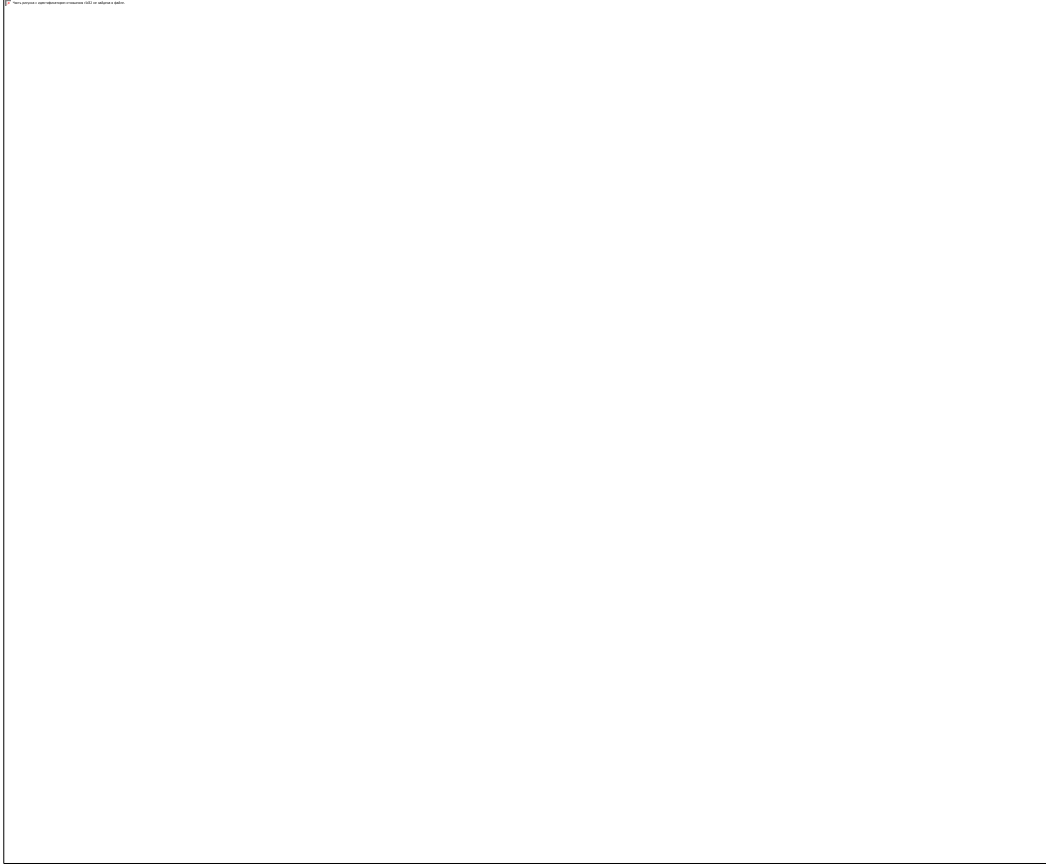
**3D-моделі деталей руки робота на базі проекту відкритого коду**

Рисунок Б.1 – Основа долоні

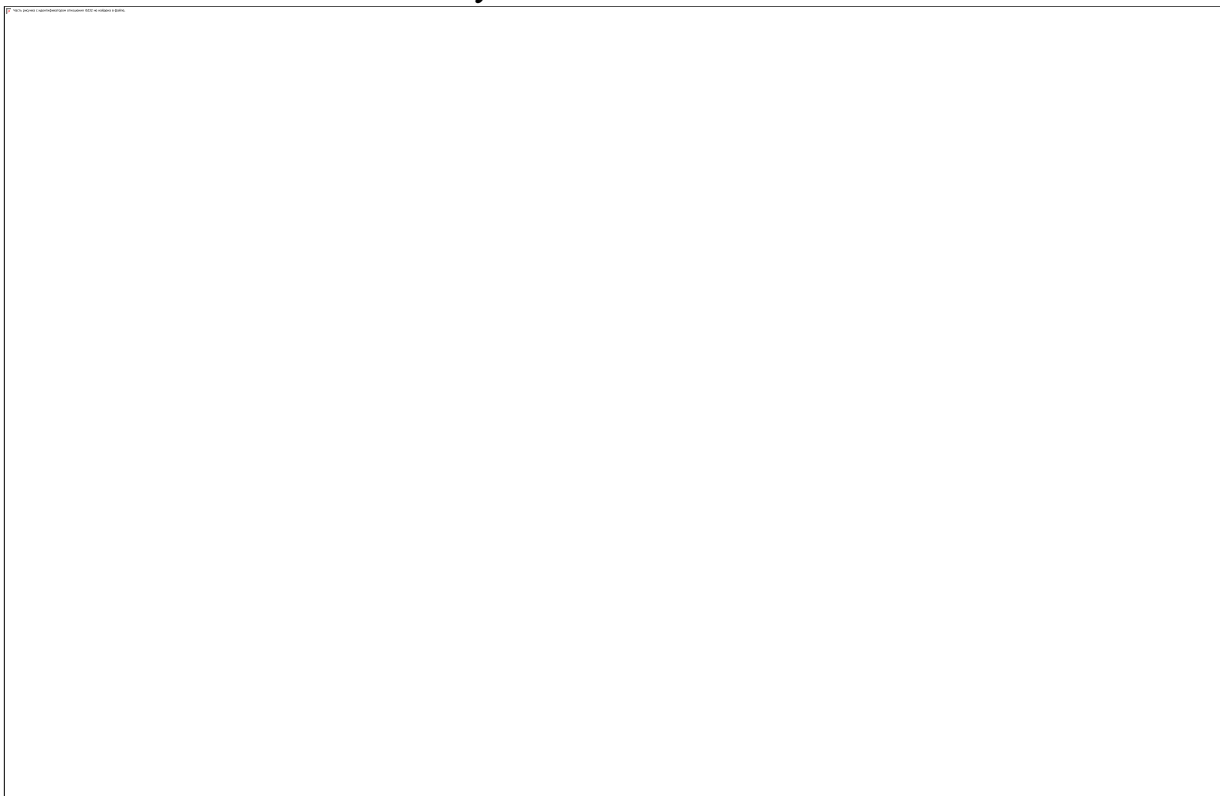


Рисунок Б.2 – Модель пальця руки



Рисунок Б.3 – Основа пальця

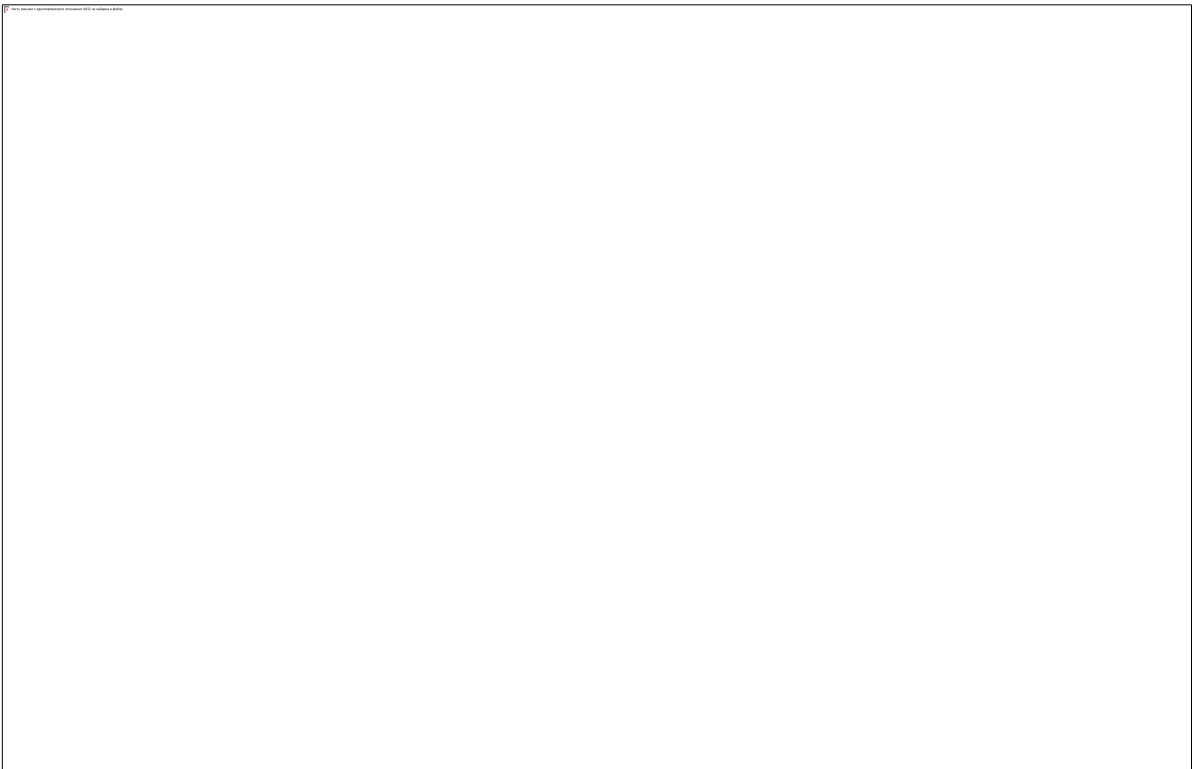


Рисунок Б.4 – Збірка зап'ястя

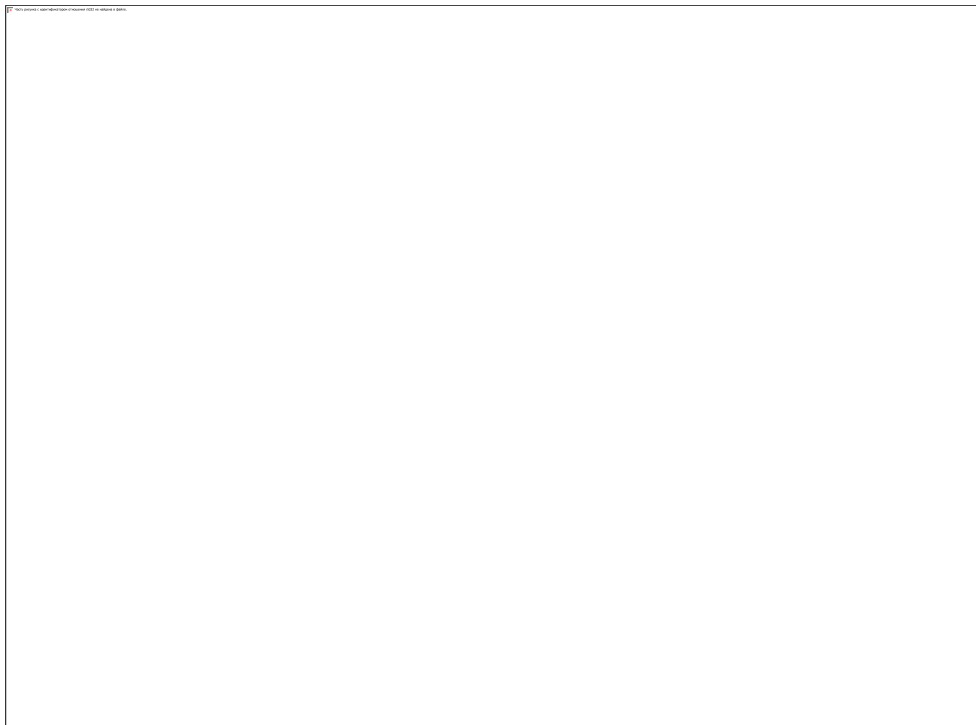


Рисунок Б.5 – Основа покриття руки

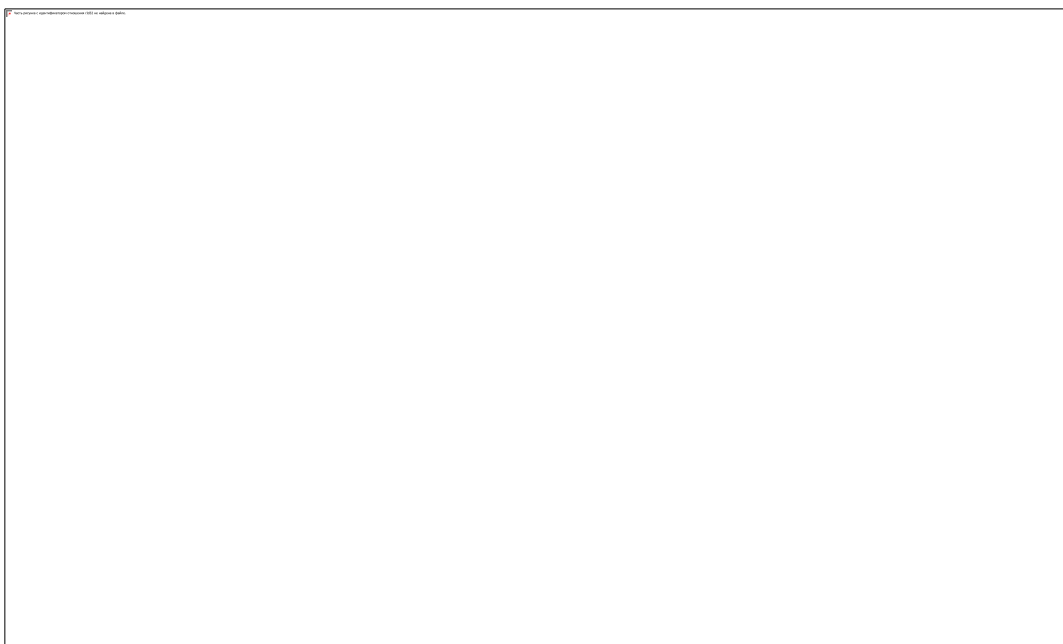


Рисунок Б.6 – Кронштейни сервоприводу



Рисунок Б.7 – Деталі основи кисті

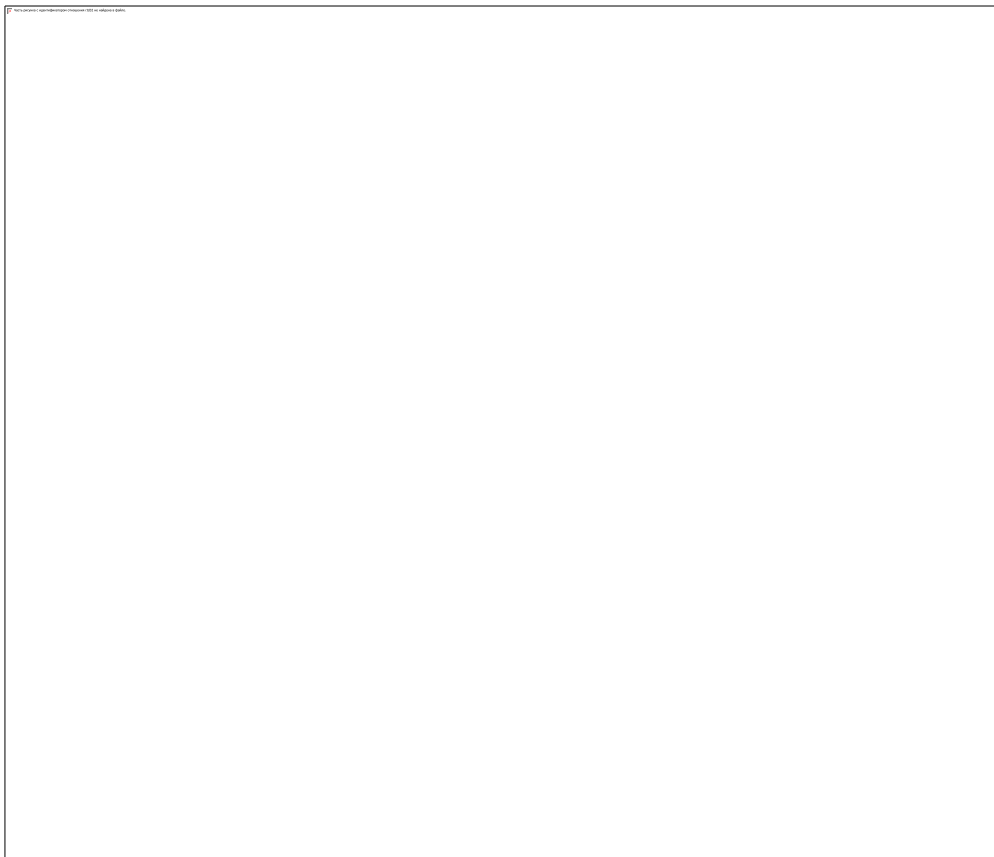


Рисунок Б.8 – Колінчасте кріплення