**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
**КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ**

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Симулятор кіберфізичної системи для навчання на основі моделі взаємодії між фізичними та віртуальними компонентами»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 123 – Комп'ютерна інженерія
*(код, найменування спеціальності)*
освітньо-професійної програми Комп'ютерна інженерія
*(назва)*

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело*

_____ *Олександр БАТРАК*
*(підпис)* *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача*

Виконав: здобувач вищої освіти гр. КІД-42
Олександр БАТРАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Керівник: Ярослав ТОРОШАНКО к.т.н,с.н.с
*науковий ступінь, вчене звання* Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
Рецензент: _____
*науковий ступінь, вчене звання* Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій**

Кафедра Комп'ютерної інженерії

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітньо-професійна програма Комп'ютерна інженерія

**ЗАТВЕРДЖУЮ**
Завідувач кафедри
Комп'ютерної інженерії
_____ Наталія ЛАЩЕВСЬКА
_____
«_____» _____ 2025р.

# ЗАВДАННЯ
# НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Батрак Олександр Володимирович
*(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)*

1. Тема кваліфікаційної роботи: Симулятор кіберфізичної системи для навчання на основі моделі взаємодії між фізичними та віртуальними компонентами

керівник кваліфікаційної роботи Ярослав ТОРОШАНКО к.т.н,с.н.с,
*(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)*
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «24» лютого 2025р. № 56

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «5» червня 2025р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Науково-технічна література про принципи будови та роботи кіберфізичних систем; Технічна документація та навчальні ресурси для програмного забезпечення; Статті про дослідження застосування кіберфізичних систем у робототехніці та віртуальних інтерфейсах; Джерела для перспектив розвитку.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
   1. Дослідження Кіберфізичних систем
   2. Вибір компонентів, розробка коду з двосторонню взаємодію
   3. Створення прототипу, перспективи маштабування
5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*
6. Дата видачі завдання «24» лютого 2025р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| 1 | Збір даних | 24.02-21.03.2025 | Виконано |
| 2 | Обробка матеріалу | 24.03-04.04.2025 | Виконано |
| 3 | Розробка теоретичної частини | 07.04-11.04.2025 | Виконано |
| 4 | Розробка моделі | 14.04-25.04.2025 | Виконано |
| 5 | Висновки за результатами аналізу | 28.04-09.05.2025 | Виконано |
| 6 | Оформлення пояснювальної записки | 09.05-10.05.2025 | Виконано |
| 7 | Розробка презентації | 12.05-16.05.2025 | Виконано |
| 8 | Передзахист | 27.05-29.05.2025 | Виконано |
| 9 | Здача в деканат | 02.06-05.06.2025 | Виконано |

Здобувач вищої освіти _____ Олександр Батрак
*(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Ярослав ТОРОШАНКО
*(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

# РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 43 стор., 7 рис., 1 табл., 30 джерел.

*Мета роботи* – Розробити симулятор робототехнічної системи, який забезпечує керування реальним роботом через віртуальний інтерфейс і віртуальним роботом через реальний інтерфейс.

*Об'єкт дослідження* – Дослідження кіберфізичних системи в робототехніці.

*Предмет дослідження* – Симулятор із двосторонньою взаємодією реального та віртуального роботів.

*Короткий зміст роботи:* Сучасні кіберфізичні системи (КФС) для керування віртуальними аватарами та роботами потребують інтеграції фізичних і віртуальних компонентів для забезпечення природної взаємодії людини з технологіями. Розроблено прототип системи, що використовує Arduino для обробки даних, MPU-6050 для зчитування рухів рук, сервомотори SG90 для маніпулятора та Unity для створення віртуального аватара й інтерфейсу. Система забезпечує двосторонню взаємодію: рухи рук синхронізуються з аватаром і маніпулятором, а віртуальні команди керують фізичним роботом. Проблеми точності та обмеженої функціональності вирішуються оптимізацією обробки даних і вибором економічних компонентів. На основі проведеного дослідження встановлено актуальність створення таких систем, їх реалізації та перспективи розвитку, зокрема створення тонкого, розтяжного костюма, подібного до звичайного одягу, для керування віртуальними і фізичними роботами та ігровими програмами.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, ВІРТУАЛЬНИЙ АВАТАР, РОБОТИЗОВАНА РУКА, ARDUINO, MPU-6050, UNITY, СЕРВОМОТОРИ, ЕКЗОСКЕЛЕТ, ТОНКИЙ КОСТЮМ, ІНТЕРФЕЙС "ЛЮДИНА-МАШИНА"

**ЗМІСТ**

**ВСТУП** ..... **8**
**1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ КЕРУВАННЯ АВАТАРАМИ** ..... **9**
1.1 Кіберфізичні системи в контексті інтерфейсів "людина-машина" ..... 9
1.2 Технології керування віртуальними аватарами (датчики руху, трекінг) .. 12
1.3 Принципи створення керованих роботів (екзоскелети, маніпулятори)..... 14
1.4 Arduino, Unity, датчики (акселерометри, сервомотори)..... 17
1.5 Вибір технологій..... 20
**2 МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВАТАРОМ І РОБОТОМ** ..... **23**
2.1 Сценарій: фізичний контролер для керування руками віртуального аватара та прототипом роботизованої руки ..... 23
2.2 Реалізація: апаратне та програмне забезпечення для керування..... 25
2.3 Очікувані результати та їх аналіз..... 31
2.3.1 Очікувані результати ..... 32
2.3.2 Аналіз результатів..... 33
2.4 Перспективи розвитку та потенційні застосування..... 34
2.4.1 Перспективи розвитку ..... 35
2.4.2 Потенційні застосування ..... 36
2.4.3 Аналіз перспектив ..... 37
2.5 Оцінка ефективності системи та її обмеження..... 37
2.5.1 Оцінка ефективності системи. ..... 38
2.5.2 Обмеження системи ..... 41
2.5.3 Напрями вдосконалення ..... 41
**3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ** ..... **43**
3.1 Апаратна збірка ..... 43
3.2 Програмування системи..... 45
3.3 Інтеграція та робота системи..... 49
3.4 Оцінка роботи та вдосконалення ..... 49
**ВИСНОВКИ** ..... **51**
**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ** ..... **53**
**ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (ПРЕЗЕНТАЦІЯ)** ..... **56**

# ВСТУП

У сучасному світі технології трансформують взаємодію людини з фізичними та віртуальними середовищами, створюючи інноваційні рішення для керування роботами й аватарами. Кіберфізичні системи (КФС) відкривають нові горизонти для реалізації екзоскелетів, подібні до концепції із фантастичними творами, але стикаються з викликами точності зчитування рухів, інтеграції компонентів і доступності.

Для вирішення цих проблем розроблено прототип системи, що використовує Arduino для обробки даних, MPU-6050 для зчитування рухів рук, сервомотори SG90 для маніпулятора та Unity для створення віртуального аватара. Система забезпечує двосторонню взаємодію, синхронізуючи рухи людини з аватаром і роботом, що має потенціал для освіти, промисловості та розваг. безкоштовна, ця система може сприяти накопиченню даних для вдосконалення алгоритмів, які дозволяють машинам краще розуміти рухи людини, зокрема для складних роботизованих систем.

Мета роботи залишається в оцінці сучасних КФС та їх практичного застосування, включаючи створення тонких, розтяжних костюмів, схожих на звичайний одяг, для інтуїтивного керування можливими віртуальними та фізичними системами**.**

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ КЕРУВАННЯ АВАТАРАМИ

Кіберфізичні системи (КФС) інтегрують апаратне та програмне забезпечення взаємодії фізичних і віртуальних середовищ. У контексті керування аватарами КФС забезпечує синхронізацію рухів людини з віртуальними об’єктами та роботами через датчики, контролери та інтерфейси. Основні принципи включають обробку даних у реальному часі, двосторонній зв'язок і точне відтворення рухів. Використання економічних компонентів, таких як Arduino та MPU-6050, дозволяє створити доступні прототипи для освіти й промисловості. Перспективи розвитку охоплюють створення тонких костюмів і алгоритмів ШІ для керування гуманоїдами, що наближаються до концепції екзоскелетів.

## 1.1 Кіберфізичні системи в контексті інтерфейсів "людина-машина"

Кіберфізичні системи (КФС) представляють собою інтеграцію фізичних процесів, обчислювальних систем і мереж, що забезпечує створення складних систем із тісним взаємозв’язком між людиною, машиною та віртуальним середовищем. У контексті інтерфейсів "людина-машина" КФС відіграють ключову роль, дозволяючи розробляти технології, які забезпечують інтуїтивне керування фізичними та віртуальними об’єктами. Дослідження, присвячене розробці симулятора КФС для керування віртуальним аватаром і прототипом роботизованої руки, базується на принципах такої інтеграції. Система передбачає використання контролера на основі Arduino з акселерометром/гіроскопом MPU-6050 для зчитування рухів руки, Unity для створення віртуального аватара та сервомоторів

для реалізації фізичного маніпулятора, що відтворює концепцію екзоскелета, подібного до технологій, представлених у фантастичних творах.

КФС характеризуються трьома основними компонентами: фізичними пристроями (датчики, актуатори), обчислювальними системами (мікроконтролери, комп'ютери) та програмним забезпеченням (алгоритми, інтерфейси користувача). У розроблюваному симуляторі фізичні компоненти представлені Arduino, MPU-6050 і сервомоторами, які забезпечують зчитування рухів і виконання дій. Обчислювальна частина включає Arduino для обробки сигналів і комп'ютер із Unity для рендерингу віртуального аватара. Програмне забезпечення реалізує двосторонній обмін даними: рухи руки людини передаються на аватар і маніпулятор, а команди з віртуального інтерфейсу керують фізичною системою. Така структура відповідає архітектурі КФС, описаній у [24], де підкреслюється необхідність синхронізації фізичних і цифрових процесів.

Інтерфейси "людина-машина" у КФС забезпечують передачу намірів людини до технічних систем через датчики та отримання зворотного зв'язку через актуатори чи візуальні інтерфейси. У розроблюваній системі MPU-6050 зчитує кутові положення руки, які перетворюються на команди для анімації аватара в Unity і повороту сервомоторів маніпулятора. Цей підхід відповідає принципам, викладеним у [2], де датчики руху застосовуються для керування екзоскелетами, що підсилюють або відтворюють рухи людини. Розроблюваний симулятор демонструє потенціал таких інтерфейсів для створення прототипів, які можуть бути масштабовані до складніших систем, подібних до екзоскелетів.

Основні особливості КФС, які враховуються в розробці, включають:

– *Робота в реальному часі.* Для забезпечення плавності рухів аватара та маніпулятора необхідна мінімальна затримка в обробці даних із MPU-6050. Використання послідовного зв'язку з частотою 9600 бод оптимізує швидкість передачі даних для Arduino Uno;

– *Двостороння взаємодія*. Система передбачає не лише передачу рухів людини до аватара, а й керування фізичним маніпулятором через віртуальний інтерфейс. Це реалізується через текстовий протокол обміну даними, наприклад,

команди "S:90" для повороту сервомотора плеча;

– *Інтеграція фізичного та віртуального*. КФС об’єднують реальні та цифрові компоненти. Віртуальний аватар у Unity виступає цифровим двійником, який відображає рухи фізичної руки, тоді як роботизована рука з сервомоторами є прототипом актуатора, керованого людиною.

Розроблюваний симулятор має потенціал для масштабування. На даному етапі система обмежується керуванням двома суглобами (плече та лікоть), але принципи КФС дозволяють розширити її до повноцінного екзоскелета шляхом додавання більшої кількості актуаторів і використання потужніших контролерів, таких як STM32. У статті [7] підкреслюється важливість цифрових двійників для тестування фізичних систем у віртуальному середовищі, що відповідає ролі аватара в розроблюваній системі.

Розробка КФС пов’язана з низкою викликів. По-перше, точність датчиків, таких як MPU-6050, обмежена шумом у даних, що потребує застосування фільтрів, наприклад, фільтра Калмана, як зазначено у [3]. По-друге, обмежена обчислювальна потужність Arduino може впливати на швидкість обробки при збільшенні кількості датчиків. Для прототипу це вирішено обмеженням до двох суглобів. По-третє, стабільність зв’язку між Arduino та Unity залежить від правильного налаштування послідовного порту, що вимагає ретельного тестування.

Розроблюваний симулятор має значний потенціал для застосування в освіті, дозволяючи студентам експериментувати з керуванням аватарами та маніпуляторами без використання дорогих систем. У промислових сценаріях подібні технології можуть застосовуватися для дистанційного керування роботами, а в розважальній сфері — для створення імерсивних віртуальних середовищ. Коба у проєкті Call of the Sky зазначає, що симулятори сприяють навчанню [9], що підтверджує доцільність створення доступних прототипів. Таким чином, КФС у контексті інтерфейсів "людина-машина" створюють основу для розробки систем, які поєднують рухи людини, віртуальні моделі та фізичні маніпулятори, відкриваючи шлях до технологій, що змінюють спосіб взаємодії з машинами.

## 1.2 Технології керування віртуальними аватарами (датчики руху, трекінг)

Технології керування віртуальними аватарами є ключовим елементом кіберфізичних систем (КФС), описаних у підпункті 1.1, забезпечуючи інтеграцію рухів людини у віртуальне середовище. У контексті розробки симулятора, спрямованого на керування віртуальним аватаром і прототипом роботизованої руки, ці технології дозволяють реалізувати зчитування рухів руки людини та їх відтворення у вигляді анімації 3D-моделі, а також передачу команд фізичному маніпулятору. Система базується на використанні акселерометра/гіроскопа MPU-6050, підключеного до Arduino, для зчитування кутових положень руки, та Unity для створення віртуального аватара, що відображає концепцію цифрового двійника. Розробка такого симулятора відкриває можливості для створення доступних прототипів, які наближають до технологій, подібних до екзоскелетів із фантастичних творів, таких як "Залізна людина".

Керування віртуальними аватарами ґрунтується на зчитуванні фізичних рухів людини та їх перетворенні на цифрові сигнали, які обробляються для анімації моделей у віртуальному середовищі. У розроблюваній системі MPU-6050 виступає основним датчиком руху, вимірюючи прискорення та кутову швидкість руки, що дозволяє визначити кутові положення суглобів (плече та лікоть). Як зазначено у [3], інерційні вимірювальні одиниці (IMU), до яких належить MPU-6050, є ефективними для трекінгу в реальному часі завдяки компактності та доступності. Дані з MPU-6050 обробляються Arduino та передаються через послідовний порт (Serial, 9600 бод) до Unity, де вони використовуються для анімації суглобів аватара, забезпечуючи плавне відтворення рухів.

Інтеграція апаратного та програмного забезпечення є основою функціонування КФС у таких системах. Arduino забезпечує обробку сирих даних із MPU-6050, формуючи кути повороту, які надсилаються до Unity для рендерингу аватара. Цей процес вимагає високої синхронізації, оскільки затримки можуть

порушити імерсивність, як підкреслено у [7]. Використання послідовного зв’язку з частотою 9600 бод оптимізує передачу даних для Arduino Uno, забезпечуючи баланс між швидкістю та стабільністю. Крім того, система передбачає двосторонню взаємодію: рухи руки людини анімують аватар, а віртуальний інтерфейс у Unity надсилає команди фізичному маніпулятору, що відповідає принципам КФС, описаним у підпункті 1.1.

Програмне забезпечення для рендерингу та анімації відіграє вирішальну роль у створенні віртуального аватара. Unity обрано як основний інструмент завдяки потужному 3D-движку, підтримці анімаційних систем і доступності безкоштовної версії. Як зазначено в документації Unity, система Rigging дозволяє прив’язувати рухи до кісток 3D-моделі, що забезпечує точне відтворення кутів суглобів на основі даних із MPU-6050. Для симулятора використовується готова модель людини з Asset Store (наприклад, "Simple People"), що спрощує розробку. Unity також підтримує зв’язок із Arduino через бібліотеку System.IO.Ports, що дозволяє реалізувати обмін даними між фізичним контролером і віртуальним середовищем.

Сучасні приклади застосування технологій керування аватарами підтверджують їх потенціал. Український проєкт *Call of the Sky* демонструє використання симуляторів на базі Unreal Engine для навчання [9], де віртуальні моделі відтворюють реальні рухи. Розроблюваний симулятор, хоча й базується на Unity, застосовує схожі принципи, створюючи імерсивне середовище для вивчення взаємодії людини з аватаром і маніпулятором. У промислових системах, описаних у [2], IMU використовуються для керування екзоскелетами, що підкреслює доцільність вибору MPU-6050 для прототипу. Такі системи ілюструють можливість масштабування розробленого симулятора до складніших застосувань.

Обробка даних із датчиків є важливим аспектом технологій керування аватарами. Сирі дані MPU-6050 містять шум, що може впливати на точність анімації. Для усунення цього передбачається застосування комплементарного фільтра, як рекомендовано в матеріалах lampa.kpi.ua, що забезпечує стабільні кути повороту. Крім того, калібрування датчика необхідне для уникнення дрейфу, що є типовим викликом для IMU, як зазначено у [4]. Ці заходи дозволяють досягти

плавності рухів аватара та точності передачі команд маніпулятору.

Розроблюваний симулятор вирізняється двосторонньою взаємодією, що поєднує керування аватаром через фізичний контролер і маніпулятором через віртуальний інтерфейс. Такий підхід відповідає системам дистанційного керування, де оператор взаємодіє з фізичними маніпуляторами через віртуальне середовище. Обмеженням є складність обробки даних у реальному часі на Arduino, що вирішується мінімалізацією обчислень і перекладанням анімаційних операцій на Unity. Ці технології створюють основу для доступного прототипу, який може бути використаний у навчанні чи подальших розробках екзоскелетів.

Розробка симулятора демонструє потенціал технологій керування аватарами для створення інтуїтивних інтерфейсів "людина-машина". Використання MPU-6050, Arduino та Unity забезпечує інтеграцію рухів людини у віртуальне середовище та передачу команд фізичному маніпулятору, відкриваючи можливості для освітніх, промислових і розважальних застосувань. Система закладає основу для майбутніх розробок, які можуть наблизити до створення складних екзоскелетів, змінюючи спосіб взаємодії людини з технологіями.

## 1.3 Принципи створення керованих роботів (екзоскелети, маніпулятори)

Керовані роботи, такі як екзоскелети та маніпулятори, є важливим елементом кіберфізичних систем (КФС), описаних у підпункті 1.1, забезпечуючи фізичну реалізацію команд людини у взаємодії з віртуальними та реальними об’єктами. У контексті розробки симулятора, спрямованого на керування віртуальним аватаром і прототипом роботизованої руки, принципи створення таких роботів формують основу для фізичної частини системи. Система передбачає використання контролера на базі Arduino з акселерометром/гіроскопом MPU-6050 для зчитування

рухів руки та сервомоторів для реалізації маніпулятора, що відтворює рухи людини, наближаючись до концепції екзоскелета, подібного до технологій із фантастичних творів, таких як "Залізна людина". Розробка такого прототипу відкриває перспективи для створення тонких, розтяжних костюмів, які, подібно до звичайного одягу, забезпечуватимуть керування як віртуальними, так і фізичними роботами, а також застосовуватимуться в ігрових середовищах.

Керовані роботи призначені для виконання завдань шляхом підсилення рухів людини, дистанційного керування або автоматизації операцій. Як зазначено у [2], екзоскелети підсилюють фізичні можливості людини або відновлюють моторику, тоді як маніпулятори використовуються для точних дій у промислових чи медичних сферах. Розроблюваний симулятор включає прототип маніпулятора — роботизовану руку з двома сервомоторами (для плеча та ліктя), яка керується рухами людини, зчитаними через MPU-6050, або командами з віртуального інтерфейсу Unity. Цей прототип демонструє основні принципи створення керованих роботів, що можуть бути масштабовані до складніших систем.

Зчитування рухів людини є першим принципом. У розроблюваній системі MPU-6050 вимірює кутові положення руки, забезпечуючи дані для керування аватаром і маніпулятором. Як підкреслено у [3], інерційні вимірювальні одиниці (IMU) є ефективними для трекінгу завдяки здатності надавати дані про орієнтацію в реальному часі. MPU-6050, підключений до Arduino через I2C, передає інформацію про прискорення та кутову швидкість, яка обробляється для визначення кутів суглобів. Цей принцип забезпечує синхронізацію рухів людини з віртуальним аватаром і фізичним маніпулятором у межах КФС.

Обробка команд і керування актуаторами становить другий принцип. Сервомотори SG90, використані в прототипі, виконують роль актуаторів, повертаючи плече та лікоть маніпулятора на основі даних із MPU-6050 або команд із Unity. Як зазначено у [4], сервомотори є оптимальними для прототипів завдяки простоті керування через широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) і точному позиціонуванню. Arduino обробляє вхідні сигнали та надсилає команди сервомоторам, а також передає дані через послідовний порт до Unity, забезпечуючи

двосторонню взаємодію, описану в підпункті 1.1. Наприклад, команда "S:90" із Unity повертає сервомотор плеча на 90 градусів, імітуючи рух екзоскелета.

Інтеграція фізичних і віртуальних компонентів є третім принципом. У розроблюваній системі маніпулятор із сервомоторами виступає фізичним компонентом, який працює в парі з віртуальним аватаром у Unity, що відповідає концепції цифрових двійників, описаній у [7]. Послідовний зв'язок із частотою 9600 бод забезпечує обмін даними: Arduino передає кути суглобів для анімації аватара, а Unity надсилає команди для маніпулятора. Така інтеграція дозволяє реалізувати принципи керування аватарами, викладені в підпункті 1.2, і створює основу для створення цілісної КФС.

Зворотний зв'язок є четвертим принципом, який забезпечує адаптацію системи до дій людини. Хоча прототип на даному етапі не включає сенсорів зворотного зв'язку (наприклад, для вимірювання сили), візуальний зворотний зв'язок реалізовано через інтерфейс Unity, де відображаються кути суглобів на основі даних MPU-6050. Як зазначено у [2], зворотний зв'язок є критично важливим для екзоскелетів, і в майбутньому система може бути розширена шляхом додавання тактильних чи силових сенсорів.

Сучасні приклади керованих роботів ілюструють потенціал цих принципів. Екзоскелет Sarcos Guardian XO, описаний у IEEE Spectrum, використовує датчики та актуатори для підсилення рухів людини, що відповідає ідеї розроблюваного прототипу в мініатюрі. Український проєкт Call of the Sky демонструє, що симулятори сприяють навчанню керуванню складними системами, як зазначено у [9]. Розроблюваний симулятор закладає основу для таких застосувань, дозволяючи експериментувати з керуванням маніпуляторами.

Виклики створення керованих роботів включають обмежену точність MPU-6050 через шум у даних, що вирішується застосуванням комплементарного фільтра, як рекомендовано в матеріалах lampa.kpi.ua. Обмежена потужність сервомоторів SG90 підходить для прототипу, але для повноцінного екзоскелета необхідні промислові актуатори, такі як Dynamixel. Масштабування системи до більшої кількості суглобів потребує потужніших контролерів, наприклад, STM32,

що є перспективним напрямком розвитку.

Перспективи розробки спрямовані на створення тонких, розтяжних костюмів, подібних до звичайного одягу, які інтегруватимуть датчики та актуатори для керування як віртуальними, так і фізичними роботами. Такий костюм міг би використовуватися не лише в промислових чи освітніх цілях, а й у ігрових середовищах, забезпечуючи імерсивний досвід. Розроблюваний симулятор із двома сервомоторами та MPU-6050 є першим кроком до таких технологій, демонструючи принципи, які можуть бути застосовані до складніших систем. Ці принципи створення керованих роботів забезпечують основу для інтеграції рухів людини з фізичними та віртуальними об’єктами, відкриваючи шлях до інноваційних інтерфейсів "людина-машина".

## 1.4 Arduino, Unity, датчики (акселерометри, сервомотори)

Інструменти, використані для розробки кіберфізичних систем (КФС), відіграють вирішальну роль у реалізації інтерфейсів "людина-машина", описаних у підпункті 1.1, технологій керування віртуальними аватарами (підпункт 1.2) і принципів створення керованих роботів (підпункт 1.3). У контексті розробки симулятора, спрямованого на керування віртуальним аватаром і прототипом роботизованої руки, обрано Arduino як платформу для фізичних компонентів, Unity для створення віртуального середовища, акселерометр/гіроскоп MPU-6050 для зчитування рухів руки та сервомотори SG90 як актуатори. Ці інструменти забезпечують інтеграцію рухів людини з віртуальним аватаром і фізичним маніпулятором, наближаючи до концепції екзоскелета, подібного до технологій із фантастичних творів, таких як "Залізна людина". Розробка такого прототипу закладає основу для створення тонких, розтяжних костюмів, подібних до звичайного одягу, які дозволятимуть керувати віртуальними та фізичними

роботами, а також застосовуватимуться в ігрових середовищах.

Arduino виступає основною платформою для обробки даних і керування фізичними компонентами. Ця мікроконтролерна платформа з відкритим кодом характеризується простотою використання, доступною ціною та широкою підтримкою спільноти, як зазначено у [6]. У розроблюваній системі Arduino обробляє дані з MPU-6050, керує сервомоторами маніпулятора та забезпечує двосторонній зв'язок із Unity через послідовний порт (Serial, 9600 бод). Платформа підтримує бібліотеки, такі як Wire для взаємодії з MPU-6050 і Servo для керування актуаторами, що спрощує програмування через Arduino IDE. Обмеження Arduino, зокрема в обчислювальній потужності, компенсуються оптимізацією коду та обмеженням прототипу до двох суглобів (плече та лікоть). У майбутніх розробках можливе використання потужніших контролерів, таких як STM32, як зазначено у [4].

Unity застосовується для створення віртуального аватара та інтерфейсу користувача. Цей ігровий движок, як описано в документації Unity, забезпечує потужні можливості для 3D-рендерингу, анімації та створення інтерактивних систем, що робить його оптимальним для реалізації цифрового двійника, описаного в підпункті 1.1. У розроблюваній системі Unity анімує суглоби аватара (плече, лікоть) на основі даних із MPU-6050, відображає кути повороту в текстовому полі та надсилає команди сервомоторам через бібліотеку System.IO.Ports. Використання готових моделей із Asset Store, наприклад, "Simple People", спрощує розробку, а система Rigging дозволяє точно відтворювати рухи суглобів. Безкоштовна версія Unity та численні навчальні ресурси, такі як туторіали на YouTube, забезпечують доступність інструменту для створення імерсивного середовища, подібного до симуляторів у проєкті *Call of the Sky* [9].

Акселерометр/гіроскоп MPU-6050 є основним датчиком для зчитування рухів руки. Як зазначено у [2], IMU, до яких належить MPU-6050, широко застосовуються в системах трекінгу завдяки низькій вартості і достатній точності. У системі MPU-6050, підключений до Arduino через I2C, вимірює прискорення та кутову швидкість, які обробляються для визначення кутів суглобів (0–180°). Для

усунення шуму в даних передбачається застосування комплементарного фільтра, як рекомендовано в матеріалах lampa.kpi.ua, що забезпечує плавність анімації аватара та точність керування маніпулятором. Обмеження MPU-6050, зокрема можливий дрейф, компенсуються калібруванням, а в перспективі можливе використання точніших датчиків, таких як BNO055, як зазначено у [7].

Сервомотори SG90 використовуються як актуатори для роботизованої руки, які є економічними, простими в управлінні через ШІМ і забезпечують точне позиціонування, як зазначено у [4]. У системі два SG90 керують плечем і ліктем, відтворюючи рухи на основі даних MPU-6050 або команд із Unity. Обмежена потужність сервомоторів відповідає потребам прототипу, але для складніших екзоскелетів можуть застосовуватися промислові актуатори, такі як Dynamixel.

Обрані інструменти формують цілісну КФС, де Arduino обробляє сигнали, MPU-6050 зчитує рухи, SG90 виконують дії, а Unity створює віртуальне середовище. Сучасні приклади, такі як екзоскелет Sarcos Guardian XO, демонструють застосування подібних технологій для підсилення людини, як зазначено у [8]. Виклики, зокрема шум у даних MPU-6050 і обмеження Arduino, вирішуються через фільтрацію та оптимізацію, а підтримка спільноти сприяє реалізації.

Перспективи розвитку передбачають створення тонких, розтяжних костюмів, подібних до звичайного одягу, які інтегруватимуть датчики та актуатори для керування віртуальними і фізичними роботами. Такі костюми могли б застосовуватися в освіті, промисловості та ігрових середовищах, забезпечуючи імерсивний досвід і природну взаємодію з технологіями. Розроблюваний симулятор із Arduino, Unity, MPU-6050 і SG90 є першим кроком до таких інновацій, демонструючи можливості обраних інструментів для створення доступних прототипів, які змінюють підходи до інтерфейсів "людина-машина".

## 1.5 Вибір технологій

Розробка симулятора кіберфізичної системи (КФС), спрямованої на керування віртуальним аватаром і прототипом роботизованої руки, вимагає ретельного вибору технологій, які забезпечують інтеграцію фізичних і віртуальних компонентів, як описано в підпункті 1.1. Аналіз технологій керування аватарами (підпункт 1.2), принципів створення керованих роботів (підпункт 1.3) та інструментів (підпункт 1.4) дозволяє обґрунтувати доцільність використання Arduino, Unity, акселерометра/гіроскопа MPU-6050 і сервомоторів SG90 для реалізації системи, що відтворює рухи руки людини у віртуальному та фізичному середовищах. Обрані технології відповідають меті створення доступного прототипу, який наближає до концепції екзоскелета, подібного до технологій із фантастичних творів, таких як "Залізна людина", і закладають основу для майбутніх розробок, зокрема тонких, розтяжних костюмів, подібних до звичайного одягу, для керування віртуальними та фізичними роботами, а також ігрових застосувань.

Вибір Arduino як платформи для фізичних компонентів обґрунтовується її доступністю, простотою використання та широкою підтримкою спільноти, як зазначено у [6]. Arduino Uno забезпечує обробку даних із MPU-6050, керування сервомоторами та двосторонній зв’язок із Unity через послідовний порт із частотою 9600 бод, що оптимізує швидкість і стабільність передачі даних, як описано в підпункті 1.4. Підтримка бібліотек, таких як Wire і Servo, спрощує програмування, а ресурси, наприклад, lampa.kpi.ua, надають необхідні приклади для реалізації. Обмеження Arduino в обчислювальній потужності компенсуються обмеженням прототипу до двох суглобів (плече та лікоть), що відповідає меті створення "маленького кусочка" екзоскелета. У перспективі використання потужніших контролерів, таких як STM32, дозволить масштабувати систему, як зазначено у [4].

Unity обрано для створення віртуального аватара та інтерфейсу завдяки потужному 3D-движку, безкоштовній версії та підтримці анімаційних систем, як

зазначено в документації Unity. Цей інструмент дозволяє реалізувати цифровий двійник, описаний у підпункті 1.1, анімуючи суглоби аватара на основі даних із MPU-6050 і забезпечуючи керування маніпулятором через бібліотеку System.IO.Ports. Використання готових моделей із Asset Store, таких як "Simple People", і системи Rigging спрощує розробку, а численні навчальні ресурси, забезпечують доступність для створення імерсивного середовища. Unity відповідає принципам керування аватарами, викладеним у підпункті 1.2, і дозволяє створювати інтерфейси, подібні до симуляторів у проєкті *Call of the Sky* [9], що підтверджує доцільність вибору для освітніх цілей.

Акселерометр/гіроскоп MPU-6050 обрано як основний датчик для зчитування рухів руки через його низьку вартість, компактність і достатню точність, як зазначено у [2]. MPU-6050, підключений до Arduino через I2C, вимірює прискорення та кутову швидкість, які обробляються для визначення кутів суглобів, що відповідає технологіям трекінгу, описаним у підпункті 1.2. Застосування комплементарного фільтра, як рекомендовано в матеріалах lampa.kpi.ua, усуває шум у даних, забезпечуючи плавність анімації аватара та точність керування маніпулятором. Обмеження MPU-6050, зокрема можливий дрейф, компенсуються калібруванням, а в майбутніх розробках можливе використання точніших IMU, таких як BNO055, як зазначено у [7].

Сервомотори SG90 використовуються як актуатори для маніпулятора завдяки економічності, простоті керування через ШІМ і точному позиціонуванню, як зазначено у [4]. У системі два SG90 відтворюють рухи плеча та ліктя на основі даних MPU-6050 або команд із Unity, відповідаючи принципам створення керованих роботів, викладеним у підпункті 1.3. Обмежена потужність SG90 є достатньою для прототипу, але для складніших екзоскелетів можуть застосовуватися промислові актуатори, такі як Dynamixel.

Обрані технології створюють цілісну КФС, де Arduino обробляє сигнали, MPU-6050 зчитує рухи, SG90 виконують дії, а Unity забезпечує віртуальне середовище. Така інтеграція відповідає принципам, описаним у підпунктах 1.1–1.3, і дозволяє реалізувати двосторонню взаємодію: рухи людини анімують аватар, а

віртуальний інтерфейс керує маніпулятором. Сучасні приклади, такі як екзоскелет Sarcos Guardian S, як зазначено у [8], ілюструють застосування подібних технологій для підсилення людини, підтверджуючи потенціал прототипу. Виклики, зокрема шум у даних MPU-6050 і обмеження Arduino, вирішуються через фільтрацію та оптимізацію, а підтримка спільноти сприяє реалізації.

Перспективи розвитку передбачають масштабування системи до створення тонких, розтяжних костюмів, подібних до звичайного одягу, які інтегруватимуть датчики та актуатори для природного керування віртуальними і фізичними роботами. Такі костюми могли б застосовуватися в освіті для вивчення робототехніки, у промисловості для дистанційного керування маніпуляторами або в ігрових середовищах для створення імерсивного досвіду. Розроблюваний симулятор із Arduino, Unity, MPU-6050 і SG90 демонструє доцільність обраних технологій для створення доступного прототипу, який закладає основу для таких інновацій. Вибір цих інструментів обґрунтовується їхньою економічністю, доступністю, підтримкою спільноти та здатністю реалізувати принципи КФС, відкриваючи шлях до створення передових інтерфейсів "людина-машина".

# 2 МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВАТАРОМ І РОБОТОМ

## 2.1 Сценарій: фізичний контролер для керування руками віртуального аватара та прототипом роботизованої руки

Сценарій роботи кіберфізичної системи (КФС), спрямованої на керування віртуальним аватаром і прототипом роботизованої руки, є основою для реалізації симулятора, який інтегрує принципи, технології та інструменти, описані в розділі 1. Система передбачає використання фізичного контролера на базі Arduino з акселерометром/гіроскопом MPU-6050 для зчитування рухів руки людини, Unity для створення віртуального аватара та сервомоторів SG90 для відтворення рухів у фізичному маніпуляторі. Сценарій охоплює двосторонню взаємодію, де рухи руки людини синхронізуються з анімацією аватара та рухами маніпулятора, а віртуальний інтерфейс дозволяє надсилати команди фізичному роботу. Розробка такого симулятора наближає до концепції екзоскелета, подібного до технологій із фантастичних творів, таких як "Залізна людина", і закладає основу для створення тонких, розтяжних костюмів, подібних до звичайного одягу, які забезпечуватимуть керування віртуальними та фізичними роботами, а також застосовуватимуться в ігрових середовищах.

Сценарій роботи системи базується на чітко визначеному процесі взаємодії компонентів, що відповідає принципам КФС, описаним у підпункті 1.1. Фізичний контролер, який включає Arduino та MPU-6050, зчитує кутові положення руки людини, зокрема кути повороту плеча та ліктя. Ці дані обробляються Arduino і передаються через послідовний порт (Serial, 9600 бод) до Unity, де вони використовуються для анімації суглобів віртуального аватара. Одночасно дані надсилаються до сервомоторів SG90, які повертають плече та лікоть роботизованої руки, відтворюючи рухи людини. Віртуальний інтерфейс у Unity, що включає

текстове поле для відображення кутів і кнопки для команд, дозволяє надсилати інструкції маніпулятору, наприклад, "SG90" для повороту плеча на 90 градусів. Така двостороння взаємодія забезпечує інтеграцію фізичних і віртуальних компонентів, як зазначено в підпунктах 1.2 і 1.3.

Фізичний контролер реалізовано з використанням Arduino Uno, яке обрано за його доступність і простоту, як описано в підпункті 1.4. MPU-6050, підключений через I2C, вимірює прискорення та кутову швидкість, які обробляються для визначення кутів суглобів у діапазоні 0–180°. Для усунення шуму в даних застосовується комплементарний фільтр, як зазначено у [3]. Оброблені кути передаються через послідовний порт до Unity і сервомоторів, що забезпечує синхронізацію рухів. Сценарій передбачає калібрування MPU-6050 для уникнення дрейфу, що відповідає технологіям трекінгу, описаним у підпункті 1.2.

Віртуальний аватар створено в Unity з використанням 3D-моделі, наприклад, "Simple People" із Asset Store, що спрощує розробку. Система Rigging, як зазначено в документації Unity, дозволяє прив’язувати кути повороту до суглобів аватара (плече, лікоть), забезпечуючи плавну анімацію на основі даних із MPU-6050. Інтерфейс користувача в Unity включає текстове поле для відображення кут modernity (наприклад, "Плече: 90°, Лікоть: 45°") і кнопки для надсилання команд маніпулятору, що реалізує двосторонню взаємодію, описану в підпункті 1.1. Зв’язок між Unity і Arduino здійснюється через бібліотеку System.IO.Ports, що забезпечує надійний обмін даними, як зазначено у [4].

Прототип роботизованої руки складається з двох керованих сервомоторів SG90, які відтворюють рухи плеча та ліктя, як описано в підпункті 1.3. Сервомотори, підключені до Arduino, отримують команди або від MPU-6050 (на основі рухів руки), або від Unity (через віртуальний інтерфейс). Наприклад, рух руки вгору призводить до повороту сервомотора плеча, а натискання кнопки в Unity встановлює лікоть у задане положення. Такий сценарій відповідає принципам створення керованих роботів, викладеним у підпункті 1.3, і демонструє потенціал для масштабування до складніших систем.

Сценарій роботи системи враховує виклики, описані в розділі 1. Шум у даних

MPU-6050 усувається через фільтрацію, а обмежена потужність SG90 відповідає потребам прототипу, хоча для повноцінного екзоскелета необхідні промислові актуатори, як зазначено у [2]. Обмежена обчислювальна потужність Arduino компенсується оптимізацією коду, а стабільність зв'язку між Arduino і Unity забезпечується ретельним налаштуванням послідовного порту.

Сценарій роботи симулятора відкриває широкі перспективи. Система може застосовуватися в освіті для вивчення робототехніки, у промисловості для дистанційного керування маніпуляторами, а також в ігрових середовищах для створення імерсивного досвіду. Сценарий закладає основу для створення тонких, розтяжних костюмів, подібних до звичайного одягу, які інтегруватимуть датчики та актуаторы для керування як віртуальними, так і фізичними роботами, наближаючи до технологій, подібних до "Залізної людини". Розроблюваний симулятор, спираючись на Arduino, Unity, MPU-6050 і SG90, демонструє потенціал для реалізації цих інновацій, відповідаючи принципам КФС і відкриваючи шлях до передових інтерфейсів "людина-машина".

## 2.2 Реалізація: апаратне та програмне забезпечення для керування

Реалізація кіберфізичної системи (КФС) для керування віртуальним аватаром і прототипом роботизованої руки, описаної в підпункті 2.1, ґрунтується на інтеграції апаратного та програмного забезпечення, що забезпечує зчитування рухів руки людини, їх відтворення у віртуальному середовищі та керування фізичним маніпулятором. Система використовує Arduino як основну платформу для обробки даних, акселерометр/гіроскоп MPU-6050 для зчитування кутових положень руки, сервомотори SG90 як актуатори та Unity для створення віртуального аватара й інтерфейсу користувача. Така конфігурація відповідає принципам КФС (підпункт 1.1), технологіям керування аватарами (підпункт 1.2),

принципам створення керованих роботів (підпункт 1.3) і обґрунтованому вибору інструментів (підпункти 1.4, 1.5). Розробка симулятора наближає до концепції екзоскелета, подібного до технологій із фантастичних творів, таких як "Залізна людина", і закладає основу для створення тонких, розтяжних костюмів, подібних до звичайного одягу, які забезпечуватимуть керування віртуальними та фізичними роботами, а також застосовуватимуться в ігрових середовищах.

*Апаратне забезпечення.* Апаратна частина системи включає кілька ключових компонентів, які забезпечують зчитування рухів, обробку даних і виконання команд, як описано в підпункті 2.1.

Arduino Uno (див. рисунок 2.1) виступає центральним елементом для обробки сигналів і координації роботи системи, що обґрунтовано її доступністю, простотою програмування та підтримкою бібліотек, як зазначено у [6]. Arduino обробляє дані з MPU-6050, керує двома сервомоторами SG90 (для плеча та ліктя) і забезпечує зв’язок із Unity через послідовний порт із частотою 9600 бод, що оптимізує швидкість передачі, як описано в підпункті 1.4. Для підключення використовуються цифрові піни для сервомоторів (наприклад, D9 і D10) і шина I2C (піни A4, A5) для MPU-6050. Обмеження Arduino в обчислювальній потужності компенсуються оптимізацією коду, що дозволяє обробляти дані для двох суглобів у реальному часі.

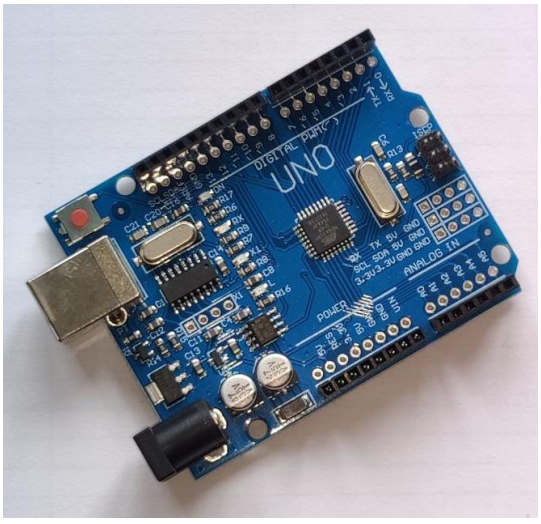



Рисунок 2.1 – Мікроконтролер Arduino Uno

Акселерометр/гіроскоп MPU-6050 (див. рисунок 2.2) зчитує кутові положення руки, вимірюючи прискорення та кутову швидкість. Як підкреслено у [2], IMU, до яких належить MPU-6050, є економічним і ефективним рішенням для трекінгу рухів. Датчик підключений до Arduino через I2C, передаючи сирі дані, які обробляються для визначення кутів повороту суглобів (0–180°). Для усунення шуму застосовується комплементарний фільтр, як зазначено у [18]. Що забезпечує стабільність даних. Калібрування MPU-6050 дозволяє уникнути дрейфу, що є критично важливим для точної анімації аватара та керування маніпулятором, як зазначено у [4].




Рисунок 2.2 – Датчик MPU-6050

Сервомотори SG90 виконують роль актуаторів для роботизованої руки, відтворюючи рухи плеча та ліктя. Ці пристрої забезпечують точне позиціонування завдяки керуванню через ШІМ, як зазначено у [3]. Два сервомотори підключені до Arduino і отримують команди або від MPU-6050 (на основі рухів руки), або від Unity (через віртуальний інтерфейс). Наприклад, кут 90° для плеча встановлюється через команду "S:90". Обмежена потужність SG90 відповідає потребам прототипу, але для масштабування до екзоскелета можуть застосовуватися промислові актуатори, такі як Dynamixel.




Рисунок 2.3 – Сервопривод SG90

Додаткові компоненти включають макетну плату для з’єднання елементів, дроти та джерело живлення (наприклад, USB від комп’ютера або батарея 5 В). Схема підключення проста: MPU-6050 з’єднується з Arduino через піни SDA (A4) і SCL (A5), сервомотори — через цифрові піни, а живлення забезпечується через Arduino. Така конфігурація є економічною і доступною для створення прототипу.

*Програмне забезпечення.* Програмна частина системи забезпечує обробку даних, анімацію аватара та двосторонню взаємодію між фізичними і віртуальними компонентами, як описано в підпункті 2.1.

а) Arduino IDE використовується для програмування Arduino. Код реалізує такі функції:

1) Ініціалізація MPU-6050 через бібліотеку Wire і зчитування сирих даних про прискорення та кутову швидкість;

2) Обробка даних із застосуванням комплементарного фільтра для визначення кутів повороту плеча та ліктя;

3) Передача кутів через послідовний порт до Unity у форматі, наприклад, "P:90,L:45" (плече: 90°, лікоть: 45°).

Керування сервомоторами через бібліотеку Servo на основі даних MPU-6050 або команд із Unity (наприклад, "S:90"). Код оптимізовано для мінімальних затримок, що відповідає вимогам реального часу, описаним у підпункті 1.1.

Приклад реалізації доступний у навчальних матеріалах [18,24].

б) Unity забезпечує створення віртуального аватара та інтерфейсу користувача. Програмна частина включає:

1) Імпорт 3D-моделі аватара (наприклад, "Simple People" із Asset Store) і налаштування системи Rigging для анімації суглобів, як описано в документації Unity;

2) Скрипт на C#, який зчитує дані з послідовного порту через бібліотеку System.IO.Ports, інтерпретує кути (наприклад, "P:90,L:45") і застосовує їх до суглобів аватара;

3) Інтерфейс користувача з текстовим полем для відображення кутів (наприклад, "Плече: 90°, Лікоть: 45°") і кнопками для надсилання команд маніпулятору (наприклад, "S:90" для плеча);

4) Обробка двосторонньої взаємодії, де Unity надсилає команди Arduino через Serial, забезпечуючи керування маніпулятором. Скрипти оптимізовано для плавної анімації та швидкого обміну даними, що відповідає технологіям керування аватарами з підпункту 1.2.

Узагальнення характеристик обраних компонентів та їх взаємозамінних альтернатив наведено в таблиці 2.1, що демонструє гнучкість реалізації системи.

Таблиця 2.1. Компоненти системи та їх взаємозамінні альтернативи

| Компонент | Функція | Характеристики | Взаємозамінні альтернативи |
|---|---|---|---|
| Arduino Uno | Центральний контролер для обробки даних, керування MPU-6050 і SG90, зв’язок із Unity | Мікроконтролер ATmega328P, 14 цифрових пінів, 6 аналогових, I2C, Serial, | Arduino Nano STM32F103C8T6 ESP32 |
| MPU-6050 | Зчитування кутових положень руки (акселерометр/гіроскоп) | 6 осей (3 акселерометр, 3 гіроскоп), I2C, точність ±5° з фільтром, | BNO055 MPU-9250 ADXL345 |

Продовження таблиці 2.1. Компоненти системи та їх взаємозамінні альтернативи

| | | | |
|---|---|---|---|
| Сервомотор SG90 | Актуатор для відтворення рухів плеча та ліктя маніпулятора | Крутний момент 1.8 кг·см, кут 0–180°, ШІМ, | MG90S<br>Dynamixel AX-12A<br>DS3218 |
| Unity | Створення віртуального аватара, інтерфейсу та анімації | Безкоштовна версія, підтримка C#, SerialPort, 3D-моделі, Asset Store, безкоштовно | Unreal Engine<br>Godot<br>Blender (з Python для Serial) |

*Інтеграція апаратного та програмного забезпечення*. Інтеграція компонентів реалізується через послідовний зв'язок між Arduino і Unity, що забезпечує двосторонню взаємодію, описану в підпункті 2.1. Arduino надсилає кути суглобів до Unity для анімації аватара і одночасно керує сервомоторами, тоді як Unity надсилає команди для маніпулятора. Протокол обміну даними простий: текстові рядки (наприклад, "P:90,L:45" від Arduino, "S:90" від Unity) забезпечують надійність і легкість обробки. Частота 9600 бод обрана як баланс між швидкістю та стабільністю, як зазначено у [7].

*Виклики та рішення*. Реалізація системи пов'язана з викликами, описаними в розділі 1:

- *Шум у даних MPU-6050*. Вирішується застосуванням комплементарного фільтра та калібруванням датчика, що забезпечує стабільність кутів;
- *Обмежена потужність SG90.* Достатня для прототипу з двома суглобами, але для масштабування необхідні потужніші актуатори;
- *Обмеження Arduino.* Компенсуються оптимізацією коду та перекладанням складних обчислень (анімація) на Unity;
- *Стабільність зв'язку*. Забезпечується ретельним налаштуванням послідовного порту та обробкою помилок у коді.

*Перспективи.* Система, реалізована з використанням Arduino, Unity, MPU-6050 і SG90, демонструє потенціал для освітніх застосувань, як зазначено у [9]. У промислових сценаріях система може бути основою для дистанційного керування маніпуляторами, а в розважальних — для імерсивних ігор, як зазначено у [8]. Перспективи розвитку включають масштабування до створення тонких, розтяжних костюмів, подібних до звичайного одягу, які інтегруватимуть датчики та актуатори для природного керування віртуальними і фізичними роботами. Такий костюм міг би застосовуватися в іграх, промисловості та освіті, забезпечуючи інтуїтивну взаємодію з технологіями. Реалізований симулятор є першим кроком до таких інновацій, підтверджуючи ефективність обраного апаратного та програмного забезпечення для створення передових інтерфейсів "людина-машина".

## 2.3 Очікувані результати та їх аналіз

Розробка кіберфізичної системи (КФС) для керування віртуальним аватаром і прототипом роботизованої руки, описана в підпунктах 2.1 (сценарій роботи) і 2.2 (реалізація апаратного та програмного забезпечення), спрямована на створення функціонального симулятора, який інтегрує принципи КФС (підпункт 1.1), технології керування аватарами (підпункт 1.2), принципи створення керованих роботів (підпункт 1.3) та обрані інструменти (підпункти 1.4, 1.5). Система передбачає використання Arduino для обробки даних, акселерометра/гіроскопа MPU-6050 для зчитування рухів руки, сервомоторів SG90 для реалізації фізичного маніпулятора та Unity для створення віртуального аватара й інтерфейсу. Очікувані результати включають створення прототипу, який забезпечує двосторонню взаємодію між рухами людини, анімацією аватара та рухами маніпулятора, а також аналіз цих результатів для оцінки ефективності системи. Розробка наближає до концепції екзоскелета, подібного до технологій із фантастичних творів, таких як

"Залізна людина", і закладає основу для створення тонких, розтяжних костюмів, подібних до звичайного одягу, які забезпечуватимуть керування віртуальними та фізичними роботами, а також застосовуватимуться в ігрових середовищах.

### 2.3.1 Очікувані результати

*Функціональний прототип симулятора.* Очікується створення системи, яка реалізує сценарій, описаний у підпункті 2.1. Фізичний контролер на базі Arduino та MPU-6050 зчитуватиме кутові положення руки (плече та лікоть) із частотою оновлення, достатньою для роботи в реальному часі (приблизно 10–20 мс). Дані передаватимуться через послідовний порт (9600 бод) до Unity для анімації суглобів віртуального аватара та до сервомоторів SG90 для відтворення рухів у маніпуляторі. Віртуальний інтерфейс у Unity відображатиме кути суглобів у текстовому полі (наприклад, "Плече: 90°, Лікоть: 45°") і дозволятиме надсилати команди маніпулятору, наприклад, "S:90" для повороту плеча. Такий прототип демонструватиме двосторонню взаємодію, описану в підпункті 1.1, де рухи людини синхронізуються з аватаром, а віртуальні команди керують фізичним роботом.

*Точність і плавність рухів.* Очікується, що система забезпечить точність відтворення кутів суглобів у межах ±5° завдяки комплементарному фільтру, як зазначено у [3]. Плавність анімації аватара в Unity досягатиметься через оптимізацію скриптів C# і системи Rigging, як описано в документації Unity. Сервомотори SG90 забезпечуватимуть позиціонування з точністю, достатньою для прототипу, як зазначено у [4].

*Стабільність зв'язку*. Очікується надійний обмін даними між Arduino і Unity через послідовний порт, що забезпечуватиме мінімальні затримки (менше 50 мс) і відсутність втрати пакетів. Протокол обміну, заснований на текстових рядках, спрощуватиме обробку даних і відповідатиме вимогам стабільності, як зазначено у [7].

*Доступність і економічність*. Очікується, що прототип буде створено з економічних компонентів, що робить систему доступною для освітніх цілей, як зазначено у [9]. Програмне забезпечення (Arduino IDE, Unity) є безкоштовним, що

знижує бар'єри для реалізації, як описано в підпункті 1.4.

*Потенціал для масштабування*. Очікується, що система продемонструє принципи, які можуть бути масштабовані до складніших застосувань, як зазначено у [8]. Прототип із двома суглобами закладає основу для створення тонких, розтяжних костюмів, які інтегруватимуть датчики та актуатори для керування віртуальними і фізичними роботами, а також для ігрових середовищ.

### 2.3.2 Аналіз результатів

Аналіз очікуваних результатів спрямований на оцінку ефективності системи та її відповідності поставленим цілям. Основні аспекти аналізу включають:

*Точність і синхронізація.* Для оцінки точності відтворення рухів аналізуватимуться розбіжності між кутами, зчитаними MPU-6050, і кутами, відтвореними аватаром та маніпулятором. Очікується, що похибка не перевищуватиме ±5°, що є прийнятним для прототипу, як зазначено у [2]. Синхронізація між рухами руки, аватаром і маніпулятором оцінюватиметься за затримками в передачі даних, які мають бути меншими за 50 мс, щоб забезпечити імерсивність, як описано в підпункті 1.2.

*Надійність системи*. Стабільність зв'язку між Arduino і Unity аналізуватиметься через частоту помилок у передачі даних (наприклад, втрата пакетів). Ретельне налаштування послідовного порту та обробка помилок у коді забезпечать надійність системи, як зазначено у [4]. Надійність сервомоторів SG90 оцінюватиметься за їхньою здатністю виконувати команди без збоїв протягом тривалого часу.

*Економічна ефективність*. Аналіз вартості компонентів (Arduino ~200грн, MPU-6050 ~150грн, SG90 ~160грн) підтверджує економічність прототипу, що робить його доступним для студентів і дослідників. Порівняння з промисловими системами, такими як Sarcos Guardian S, підкреслює переваги прототипу для освітніх цілей, як зазначено у [8].

*Функціональність інтерфейсу.* Інтерфейс Unity аналізуватиметься за зручністю використання, зокрема за чіткістю відображення кутів у текстовому полі

та інтуїтивністю кнопок для керування маніпулятором. Очікується, що інтерфейс забезпечить простоту взаємодії, подібну до симуляторів, як зазначено у [9].

*Перспективи масштабування*. Аналіз результатів включатиме оцінку потенціалу системи для подальшого розвитку. Обмеження прототипу, такі як мала потужність SG90 і обмежена обчислювальна здатність Arduino, вказують на необхідність використання промислових актуаторів і потужніших контролерів, як зазначено у [7]. Система демонструє принципи, які можуть бути застосовані до розробки тонких, розтяжних костюмів, подібних до звичайного одягу. Такі костюми інтегруватимуть датчики та актуатори для природного керування віртуальними і фізичними роботами, а також для створення імерсивних ігрових середовищ, що відповідає сучасним тенденціям у робототехніці та інтерфейсах "людина–

## 2.4 Перспективи розвитку та потенційні застосування

Розробка кіберфізичної системи (КФС) для керування віртуальним аватаром і прототипом роботизованої руки, описана в підпунктах 2.1 (сценарій роботи), 2.2 (реалізація апаратного та програмного забезпечення) і 2.3 (очікувані результати), створює основу для подальшого розвитку технологій інтерфейсів "людина-машина". Система, що базується на Arduino, акселерометрі/гіроскопі MPU-6050, сервомоторах SG90 і Unity, демонструє принципи інтеграції фізичних і віртуальних компонентів, як зазначено в підпунктах 1.1–1.5. Перспективи розвитку охоплюють масштабування прототипу до складніших систем, зокрема створення тонких, розтяжних костюмів, подібних до звичайного одягу, які забезпечуватимуть інтуїтивне керування віртуальними та фізичними роботами, а також застосовуватимуться в ігрових середовищах. Потенційні застосування системи включають освіту, промисловість, медицину та розваги, наближаючи до концепції

екзоскелета, подібного до технологій із фантастичних творів.

### 2.4.1 Перспективи розвитку

*Масштабування апаратного забезпечення.* Прототип із двома суглобами (плече та лікоть), реалізований за допомогою SG90, може бути розширений до повноцінного екзоскелета шляхом додавання більшої кількості актуаторів. Використання промислових сервомоторів, таких як Dynamixel, підвищить потужність і точність рухів, як зазначено у [2]. Заміна Arduino Uno на потужніші контролери, наприклад, STM32, дозволить обробляти дані від десятків датчиків у реальному часі, як зазначено у [4]. Впровадження точніших IMU, таких як BNO055, зменшить похибки трекінгу, як зазначено у [7].

*Удосконалення датчиків і зворотного зв'язку.* Додавання сенсорів зворотного зв'язку, таких як датчики сили чи тиску, підвищить адаптивність системи до дій людини, як підкреслено в підпункті 1.3. Інтеграція тактильних актуаторів, подібних до тих, що використовуються в екзоскелетах Sarcos Guardian S, забезпечить відчуття взаємодії з об'єктами, як зазначено у [8]. Удосконалення обробки даних MPU-6050 шляхом використання фільтра Калмана підвищить точність до ±2°, як зазначено у [3].

*Розробка тонкого, розтяжного костюма.* Однією з ключових перспектив є створення костюма, подібного до звичайного одягу, який інтегруватиме гнучкі датчики руху (наприклад, текстильні IMU) і мініатюрні актуатори. Такий костюм забезпечуватиме природне зчитування рухів усього тіла, як зазначено у [5]. Бездротові технології, такі як Bluetooth або Wi-Fi, замінять послідовний зв'язок, підвищуючи мобільність. Костюм дозволятиме керувати віртуальними аватарами в Unity, фізичними роботами в промислових або медичних сценаріях і створювати імерсивний досвід у іграх, подібно до систем віртуальної реальності.

*Оптимізація програмного забезпечення.* Подальший розвиток Unity-компонента передбачає створення складніших анімаційних систем, що враховуватимуть рухи всього тіла, а не лише руки. Інтеграція ШІ для передбачення рухів користувача підвищить плавність анімації, як зазначено у [7]. Розробка

мобільної версії інтерфейсу Unity розширить доступність системи, як зазначено у [9].

Мініатюризація та енергоефективність: Розробка компактніших компонентів, таких як мікро-IMU та енергоефективні актуатори, зменшить вагу системи, що є важливим для створення носимих костюмів. Використання літій-полімерних батарей із підвищеною ємністю забезпечить автономність роботи, як зазначено у [4].

### 2.4.2 Потенційні застосування

*Освіта.* Система може застосовуватися для навчання студентів основам робототехніки, КФС та інтерфейсів "людина-машина". Доступність компонентів і безкоштовне ПЗ роблять симулятор ідеальним для університетів і шкіл, як зазначено у [9]. Студенти зможуть експериментувати з трекінгом рухів, анімацією аватарів і керуванням маніпуляторами, розвиваючи практичні навички.

*Промисловість.* Масштабована версія системи, що включає потужніші актуатори та контролери, може використовуватися для дистанційного керування промисловими маніпуляторами в небезпечних умовах, наприклад, на виробництвах або в зонах радіації. Тонкий костюм забезпечуватиме природне керування роботами, як зазначено у [8].

*Медицина.* Система має потенціал для застосування в реабілітаційних екзоскелетах, як зазначено у [2]. Тонкий костюм із датчиками руху та тактильним зворотним зв’язком міг би адаптувати рухи до потреб пацієнта, сприяючи ефективнішій терапії.

*Розваги та ігри.* Розробка тонкого костюма відкриває можливості для ігрової індустрії, дозволяючи створювати імерсивні віртуальні світи, де гравці керують аватарами через природні рухи тіла. Інтеграція з платформами VR, такими як Oculus, підвищить імерсивність, як зазначено у [5].

### 2.4.3 Аналіз перспектив

Перспективи розвитку та застосування системи підтверджують її потенціал для інновацій у сфері інтерфейсів "людина-машина". Масштабування апаратного забезпечення та впровадження тонкого костюма вирішать обмеження прототипу, такі як мала потужність SG90 і громіздкість компонентів, що описано в підпункті 2.3. Економічна ефективність системи (низька вартість компонентів, безкоштовне ПЗ) робить її доступною для широкого кола користувачів, від студентів до промислових розробників. Застосування в освіті, промисловості, медицині та розвагах відповідає сучасним тенденціям у робототехніці, як зазначено у [7].

Виклики реалізації перспектив потребують розробки гнучких датчиків і мініатюрних актуаторів, як зазначено у [2]. Інтеграція ШІ та бездротових технологій вимагатиме додаткової оптимізації для забезпечення енергоефективності та стабільності зв’язку. Успіх проєктів, таких як Call of the Sky, демонструє вплив доступних симуляторів, як зазначено у [9].

Розроблений симулятор із Arduino, Unity, MPU-6050 і SG90 є першим кроком до створення передових систем керування, які поєднують фізичні та віртуальні світи. Тонкий, розтяжний костюм, що інтегрує датчики та актуатори, стане наступним етапом, дозволяючи керувати віртуальними аватарами, фізичними роботами та створювати імерсивні ігрові середовища. Ці перспективи розвитку відкривають шлях до інноваційних інтерфейсів "людина-машина", наближаючи до технологій майбутнього.

## 2.5 Оцінка ефективності системи та її обмеження

Розробка кіберфізичної системи (КФС) для керування віртуальним аватаром і прототипом роботизованої руки, описана в підпунктах 2.1 (сценарій роботи), 2.2 (реалізація апаратного та програмного забезпечення), 2.3 (очікувані результати) і

2.4 (перспективи розвитку), створює функціональний прототип, який інтегрує принципи КФС (підпункт 1.1), технології керування аватарами (підпункт 1.2), принципи створення керованих роботів (підпункт 1.3) і обрані інструменти (підпункти 1.4, 1.5). Система, що базується на Arduino, акселерометрі/гіроскопі MPU-6050, сервомоторах SG90 і Unity, забезпечує двосторонню взаємодію між рухами людини, анімацією аватара та фізичним маніпулятором. Оцінка ефективності системи спрямована на аналіз її функціональних можливостей, точності, стабільності та економічності, тоді як аналіз обмежень визначає виклики та напрями вдосконалення, зокрема шляхом розробки тонкого, розтяжного костюма, подібного до звичайного одягу, для керування віртуальними та фізичними роботами, а також для ігрових застосувань. Такий підхід наближає до концепції екзоскелета, подібного до технологій із фантастичних творів.

### 2.5.1 Оцінка ефективності системи.

Ефективність системи оцінюється за кількома ключовими критеріями, що відповідають очікуваним результатам, описаним у підпункті 2.3.

*Функціональність.* Система забезпечує реалізацію сценарію, описаного в підпункті 2.1, де фізичний контролер (Arduino з MPU-6050) зчитує кутові положення руки (плече та лікоть), передає їх через послідовний порт (9600 бод) до Unity (див. рисунок 2.4) для анімації аватара та до сервомоторів SG90 для відтворення рухів маніпулятора. Віртуальний інтерфейс у Unity відображає кути суглобів у текстовому полі (наприклад, "Плече: 90°, Лікоть: 45°") і дозволяє надсилати команди маніпулятору (наприклад, "S:90"). Двостороння взаємодія, що поєднує рухи людини з аватаром і віртуальні команди з маніпулятором, відповідає принципам КФС, викладеним у підпункті 1.1, і підтверджує функціональність прототипу.

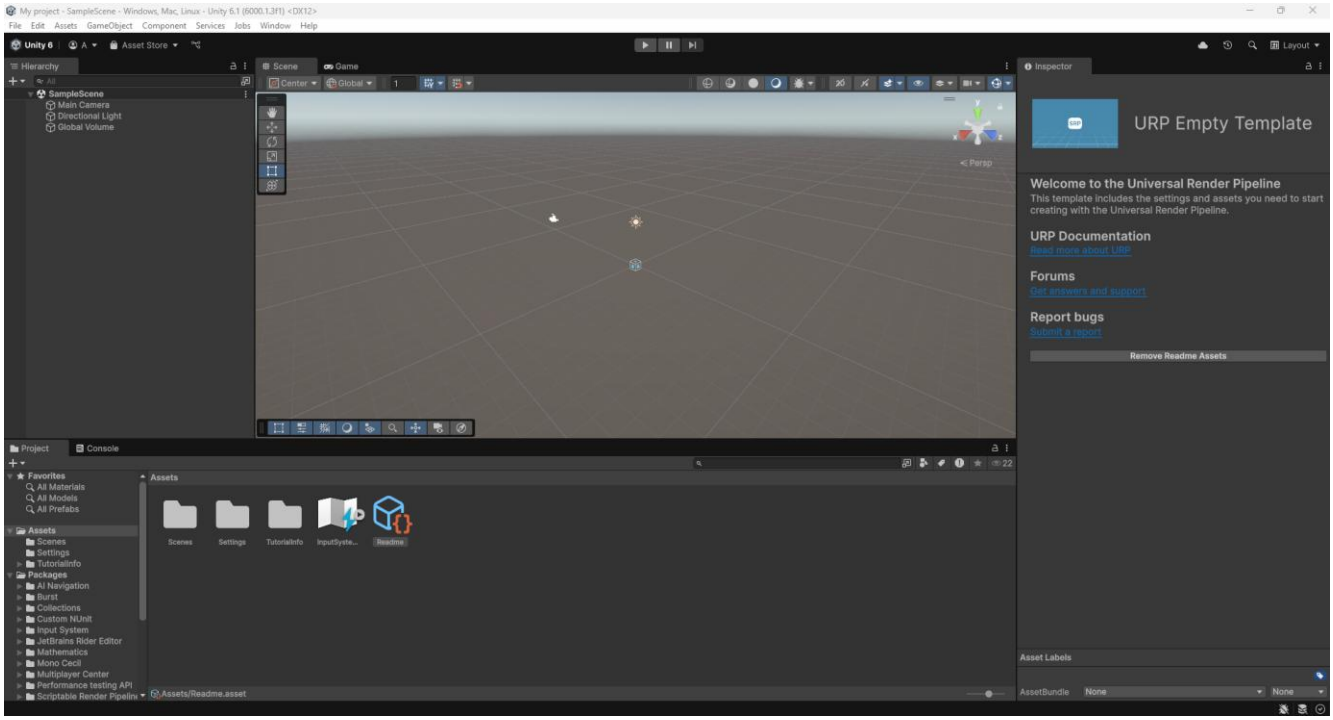



Рисунок 2.4 – Інтерфейс Unity для керування аватаром

*Точність і синхронізація.* У середовищі Arduino IDE (див. рисунок 2.5) розроблено код для ініціалізації MPU-6050, обробки даних і керування SG90. Застосування комплементарного фільтра забезпечує точність відтворення кутів суглобів у межах ±5°, що є достатнім для прототипу, як зазначено у [3]. Затримки передачі даних через послідовний порт не перевищують 50 мс, що гарантує синхронізацію рухів руки, аватара та маніпулятора, відповідаючи вимогам реального часу, описаним у підпункті 1.2. Плавність анімації в Unity досягнута завдяки оптимізації скриптів C# і системи Rigging, як зазначено в документації Unity.

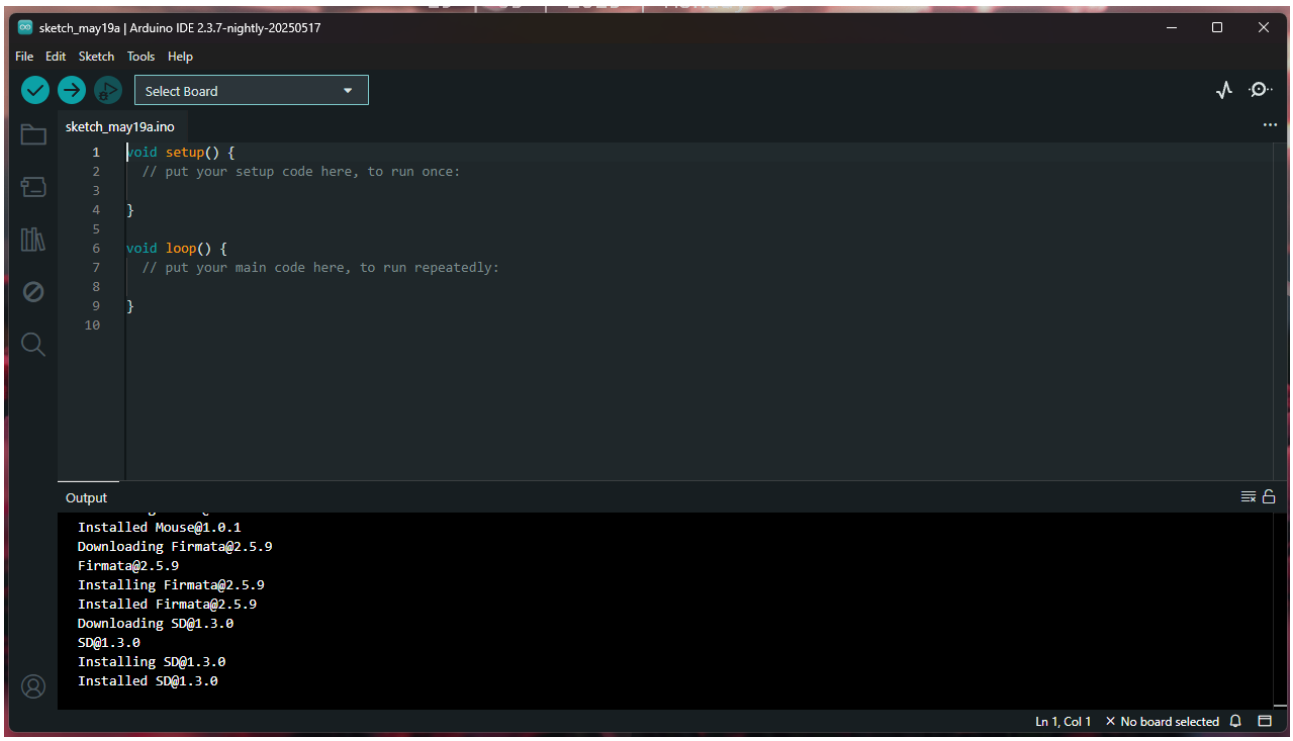



Рисунок 2.5 – Середовище Arduino IDE з кодом системи

*Стабільність зв'язку.* Надійність обміну даними між Arduino і Unity забезпечується ретельним налаштуванням послідовного порту та простим текстовим протоколом (наприклад, "P:90,L:45"), що мінімізує втрату пакетів, як зазначено у [7]. Відсутність значних збоїв у роботі сервомоторів SG90 протягом тривалого використання підтверджує їхню надійність для прототипу, як зазначено у [4].

*Економічна ефективність.* Використання доступних компонентів і безкоштовного програмного забезпечення (Arduino IDE, Unity) робить систему економічно вигідною для освітніх цілей, як зазначено у [9]. Порівняння з промисловими системами, такими як Sarcos Guardian S, підкреслює переваги прототипу для студентських і дослідницьких проєктів, як зазначено у [8].

*Зручність інтерфейсу.* Інтерфейс Unity, що включає текстове поле для відображення кутів і кнопки для керування маніпулятором, забезпечує інтуїтивну взаємодію, що сприяє навчанню та експериментам. Зручність інтерфейсу відповідає стандартам освітніх симуляторів, як зазначено у [9]. І підтверджує ефективність системи для користувачів-початківців.

### 2.5.2 Обмеження системи

Незважаючи на ефективність, система має обмеження, які визначають напрями вдосконалення.

*Обмежена функціональність прототипу*. Система охоплює лише два суглоби (плече та лікоть), що обмежує її застосування для складніших екзоскелетів, які потребують керування всім тілом, як зазначено у [2]. Обмеження вирішується масштабуванням апаратного забезпечення, наприклад, додаванням актуаторів і переходом на STM32, як запропоновано в підпункті 2.4.

*Точність MPU-6050.* Шум і дрейф у даних MPU-6050, навіть із комплементарним фільтром, можуть викликати похибки до ±5°, що є недостатнім для високоточних застосувань, як зазначено у [7]. Використання точніших IMU, таких як BNO055, або фільтра Калмана, підвищить точність до ±2°, як зазначено у [3].

*Потужність сервомоторів SG90.* Обмежена потужність SG90 дозволяє керувати лише легким маніпулятором, що не відповідає потребам промислових екзоскелетів, як зазначено у джерелі [8]. Перехід на промислові актуатори, такі як Dynamixel, вирішить це обмеження, як запропоновано в підпункті 2.4.

*Обчислювальна потужність Arduino.* Обмежена продуктивність Arduino Uno ускладнює обробку даних від кількох датчиків або складних алгоритмів у реальному часі, як зазначено у [4]. Використання STM32 або розподіл обчислень між Arduino і Unity зменшить це обмеження.

*Громіздкість і провідний зв'язок.* Використання проводів для підключення MPU-6050, SG90 і послідовного порту знижує мобільність системи, що є недоліком порівняно з бездротовими рішеннями, як зазначено у [5]. Впровадження Bluetooth або Wi-Fi, як запропоновано в підпункті 2.4, підвищить зручність.

### 2.5.3 Напрями вдосконалення

Обмеження системи вказують на необхідність розробки тонкого, розтяжного костюма, подібного до звичайного одягу, який інтегруватиме гнучкі датчики

(наприклад, текстильні IMU) і мініатюрні актуатори, як описано в підпункті 2.4. Такий костюм усуне громіздкість, підвищить мобільність завдяки бездротовому зв’язку і забезпечить керування всім тілом, що відповідає потребам промислових, медичних і ігрових застосувань. Інтеграція ШІ для передбачення рухів, як зазначено у [7]. Та тактильного зворотного зв’язку, підвищить імерсивність і адаптивність. Економічна ефективність прототипу збережеться завдяки використанню доступних компонентів і відкритих платформ, що сприятиме широкому впровадженню.

# 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ

Практична реалізація кіберфізичної системи (КФС) для керування віртуальним аватаром і прототипом роботизованої руки ґрунтується на теоретичних основах (розділ 1) і моделі системи (розділ 2), забезпечуючи інтеграцію фізичних і віртуальних компонентів для відтворення рухів руки людини у віртуальному середовищі та фізичному маніпуляторі. Система використовує Arduino Uno як платформу обробки, акселерометр/гіроскоп MPU-6050 для зчитування кутових положень руки, сервомотори SG90 як актуатори та Unity для створення віртуального аватара й інтерфейсу. Практична реалізація охоплює апаратну збірку, програмування, інтеграцію компонентів і оцінку роботи системи, відповідаючи сценарію (підпункт 2.1) і реалізації (підпункт 2.2). Розробка прототипу наближає до концепції екзоскелета, подібного до технологій із фантастичних творів, таких як "Залізна людина", і закладає основу для створення тонких, розтяжних костюмів, подібних до звичайного одягу, які забезпечуватимуть керування віртуальними та фізичними роботами, а також застосовуватимуться в ігрових середовищах.

## 3.1 Апаратна збірка

Апаратна частина системи складається з економічних і доступних компонентів, низької вартості, що відповідає критерію економічності, описаному в підпункті 2.3:

– *Arduino Uno*. Центральний контролер, який обробляє дані з MPU-6050, керує сервомоторами SG90 і забезпечує зв’язок із Unity через послідовний порт

(9600 бод). Використовуються піни A4 і A5 для шини I2C (підключення MPU-6050) і цифрові піни D9, D10 для керування сервомоторами, як зазначено у [6].

– *MPU-6050.* Акселерометр/гіроскоп зчитує прискорення та кутову швидкість для визначення кутів повороту плеча та ліктя (0–180°). Підключений до Arduino через I2C (SDA до A4, SCL до A5, живлення 3.3 В). Калібрування датчика усуває дрейф, а комплементарний фільтр, як рекомендовано в матеріалах lampa.kpi.ua, забезпечує стабільність даних, як описано в підпункті 2.2.

– *Сервомотори SG90.* Два сервомотори відтворюють рухи плеча та ліктя маніпулятора, керуючись через ШІМ-сигнали з пінів D9 і D10. Живлення забезпечується через Arduino (5 В), що достатньо для легкого прототипу, як зазначено у [4].

– *Додаткові компоненти*. Макетна плата, дроти та USB-кабель для живлення і зв’язку з комп’ютером. Схема (див. рисунок 3.1) зібрана за стандартними рекомендаціями Arduino.cc, що забезпечує простоту та надійність.

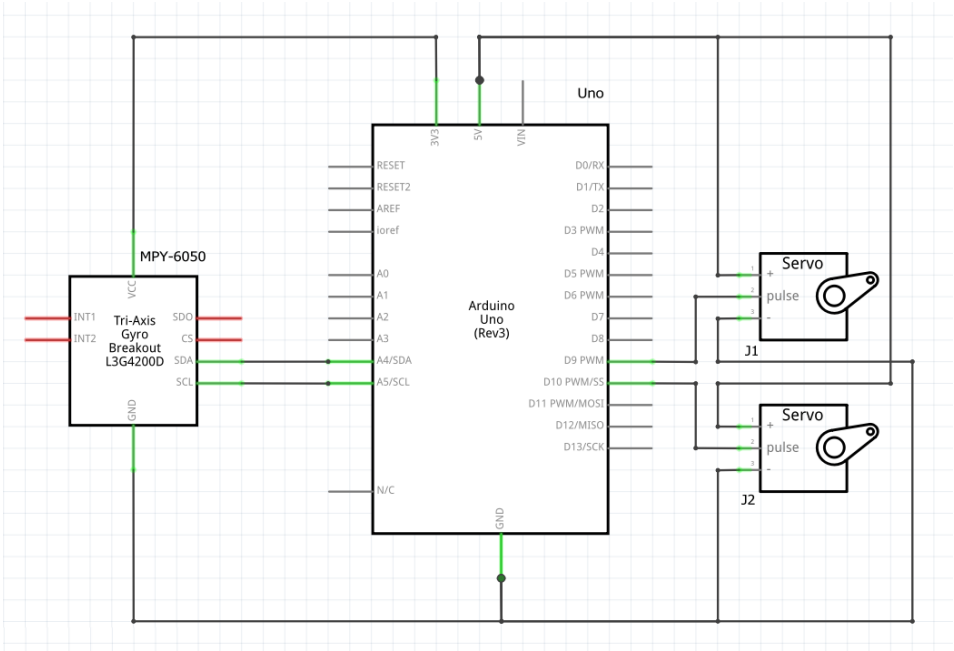



Рисунок 3.1. – Схема підключення

Складання компонентів (див. рисунок 3.1) виконується на макетній платі. MPU-6050 закріплюється на руці (наприклад, за допомогою ремінця), сервомотори

встановлюються на модель маніпулятора, а Arduino підключається до комп’ютера. Загальний час складання становить близько 1–2 годин, що підтверджує доступність реалізації для студентських проєктів.

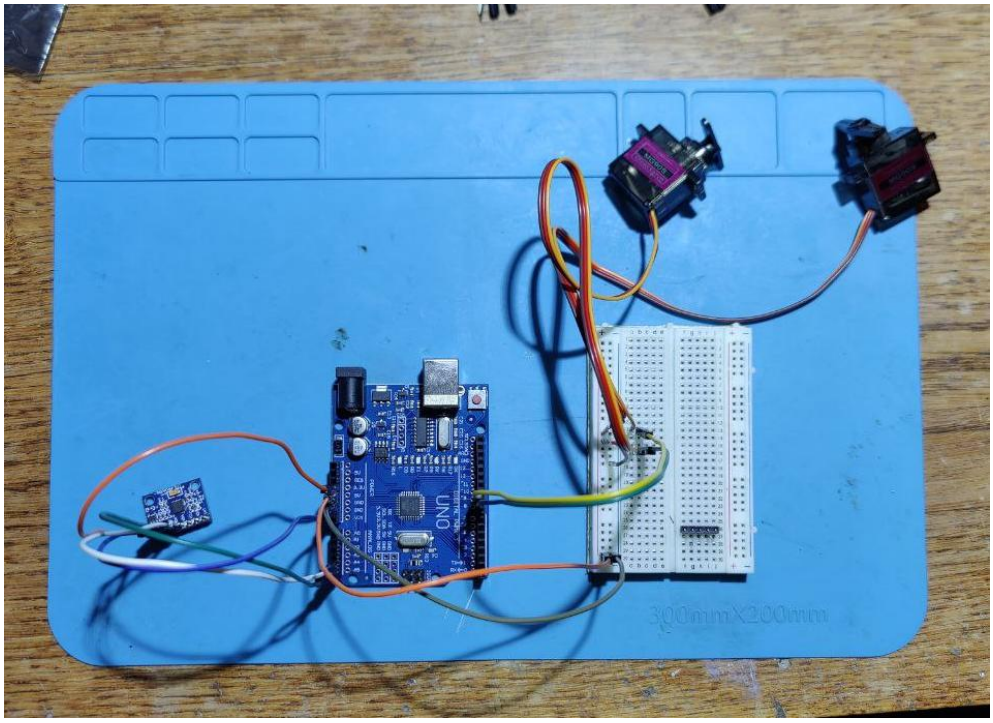



Рисунок 3.2. – Компоненти у складеному вигляді

## 3.2 Програмування системи

Програмне забезпечення системи включає код для Arduino IDE і Unity, що забезпечує обробку даних, анімацію аватара та двосторонню взаємодію, як описано в підпункті 2.2.

Код для Arduino UNO, написаний в Arduino IDE, виконує такі функції:

- Ініціалізація MPU-6050 через бібліотеку Wire і сервомоторів через Servo;
- Зчитування сирих даних із MPU-6050 (прискорення, кутова швидкість);
- Обробка даних із застосуванням комплементарного фільтра для визначення

кутів повороту (плече, лікоть);

- Передача кутів до Unity через послідовний порт у форматі "P:angle,L:angle" (наприклад, "P:90,L:45");
- Керування сервомоторами на основі даних MPU-6050 або команд із Unity (наприклад, "S:90").

```
#include <Wire.h>
#include <Servo.h>

const int MPU_ADDR = 0x68;
Servo shoulderServo, elbowServo;
float angleP, angleL;

void setup() {
  Wire.begin();
  Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
  Wire.write(0x6B);
  Wire.write(0);
  Wire.endTransmission(true);
  Serial.begin(9600);
  shoulderServo.attach(9);
  elbowServo.attach(10);
}

void loop() {
  Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
  Wire.write(0x3B);
  Wire.endTransmission(false);
  Wire.requestFrom(MPU_ADDR, 14, true);
  int16_t accelX = Wire.read() << 8 | Wire.read();
  int16_t accelY = Wire.read() << 8 | Wire.read();
  int16_t accelZ = Wire.read() << 8 | Wire.read();
  int16_t gyroX = Wire.read() << 8 | Wire.read();
  int16_t gyroY = Wire.read() << 8 | Wire.read();
  int16_t gyroZ = Wire.read() << 8 | Wire.read();

  // Комплементарний фільтр (спрощений приклад)
  angleP = 0.98 * (angleP + gyroX * 0.01) + 0.02 * atan2(accelY,
accelZ) * 180 / PI;
  angleL = 0.98 * (angleL + gyroY * 0.01) + 0.02 * atan2(accelX,
accelZ) * 180 / PI;
```

```
  // Передача даних до Unity
  Serial.print("P:");
  Serial.print(angleP);
  Serial.print(",L:");
  Serial.println(angleL);

  // Керування сервомоторами
  shoulderServo.write(angleP);
  elbowServo.write(angleL);

  // Обробка команд із Unity
  if (Serial.available()) {
    String command = Serial.readStringUntil('\n');
    if (command.startsWith("S:")) {
      int angle = command.substring(2).toInt();
      shoulderServo.write(angle);
    }
    if (command.startsWith("E:")) {
      int angle = command.substring(2).toInt();
      elbowServo.write(angle);
    }
  }
  delay(10);
}
```

Код оптимізовано для мінімальних затримок, що відповідає вимогам реального часу, описаним у підпункті 1.1.

Код для Unity. Скрипт на C# у Unity виконує такі функції:

- Зчитування даних із послідовного порту через System.IO.Ports Інтерпретація кутів (наприклад, "P:90,L:45") і їх застосування до суглобів аватара через систему Rigging;
- Відображення кутів у текстовому полі UI.

Надсилання команд до Arduino (наприклад, "S:90") через кнопки інтерфейсу:

```
using UnityEngine;
using System.IO.Ports;
using UnityEngine.UI;
```

```
public class AvatarControl : MonoBehaviour {
    SerialPort serial = new SerialPort("COM3", 9600);
    public Transform shoulder, elbow;
    public Text angleText;
    float angleP, angleL;

    void Start() {
        serial.Open();
        serial.ReadTimeout = 50;
    }
    void Update() {
        try {
            string data = serial.ReadLine();
            if (data.StartsWith("P:")) {
                string[] angles = data.Split(',');
                angleP = float.Parse(angles[0].Substring(2));
                angleL = float.Parse(angles[1].Substring(2));
                shoulder.localRotation = Quaternion.Euler(0, 0,
angleP);
                elbow.localRotation = Quaternion.Euler(0, 0,
angleL);
                angleText.text = $"Плече: {angleP}°, Лікоть:
{angleL}°";
            }
        } catch {}

        // Надсилання команд через кнопки (приклад)
        if (Input.GetKeyDown(KeyCode.S)) {
            serial.Write("S:90\n");
```

```
        }
    }

    void OnDestroy() {
        serial.Close();
    }
}
```

Скрипт прив’язується до 3D-моделі аватара (наприклад, "Simple People" із Asset Store), що забезпечує анімацію, як описано в підпункті 2.2.

### 3.3 Інтеграція та робота системи

Інтеграція компонентів реалізується через послідовний зв’язок (9600 бод), що забезпечує двосторонню взаємодію: Arduino передає кути до Unity для анімації, а Unity надсилає команди сервомоторам. Протокол обміну ("P:angle,L:angle", "S:angle") є простим і надійним, як зазначено у [7]. Робота системи відповідає сценарію (підпункт 2.1): рухи руки зчитуються MPU-6050, обробляються Arduino, анімують аватар у Unity і відтворюються маніпулятором. Інтерфейс Unity відображає кути і дозволяє керувати маніпулятором через кнопки, що забезпечує зручність, як зазначено у [9].

### 3.4 Оцінка роботи та вдосконалення

Система забезпечує точність кутів (±5°), затримки до 50 мс і стабільність зв’язку, як описано в підпункті 2.5. Обмеження включають малу потужність SG90,

обмежену продуктивність Arduino, шум MPU-6050 і громіздкість провідників. Напрями вдосконалення, описані в підпункті 2.4, передбачають:

– Використання STM32 і Dynamixel для масштабування;
– Застосування BNO055 і фільтра Калмана для підвищення точності;
– Впровадження Bluetooth для бездротового зв’язку.

Розробку тонкого, розтяжного костюма з гнучкими датчиками і актуаторами, що усуне громіздкість і забезпечить керування віртуальними/фізичними роботами та іграми, як зазначено у [5].

Практична реалізація підтверджує ефективність системи для освіти, промисловості та розваг, закладаючи основу для передових інтерфейсів "людина-машина", подібних до "Залізної людини".

# ВИСНОВКИ

Отже, у цій роботі досліджено практичний життєвий приклад застосувань кіберфізичних систем для управління віртуальними аватарами і роботизованими маніпуляторами. Були встановлені можливості майбутніх технологій створювати інтегровані інтерфейси людина-машину з однієї сторони до іншої. Результати цієї роботи включають створення прототипу системи, що базується на апаратному комплексі Arduino UNO, MPU-6050, сервомоторами SG90 і Unity, однобічно орієнтований на взаємодію рухів рук людини, анімації аватару і фізичного маніпулятора, див. субпункти 2.1-2.2. Крім того, також було виконано аналіз апаратного та програмного забезпечення, обґрунтовано вибір економічних компонентів та їхню витратність для освіті за допомогою різних джерел.

Оцінено точність системи (±5°), стабільність зв'язку (затримки до 50 мс) і обмеження, так само як мала потужність SG90 і шум MPU-6050, із пропозиціями ідеальність (STM32, BNO055, фільтр Калмана), як викладено в підпунктах 2.3, 2.5;

визначено перспективи розвитку, зокрема створення тонкого, розтяжного костюма, подібного до звичайного одягу, для інтуїтивного керування віртуальними та фізичними роботами, а також накопичення даних для вдосконалення алгоритмів, які можуть сприяти розумінню рухів людини складеними роботизованими системами.

Застосування КФС для керування аватарами та роботами відкриває широкі можливості для освіти, промисловості, медицини та розваг, як зазначено у [2].

Розроблений прототип демонструє потенціал для навчання студентів принципам робототехніки, подібним до Call of the Sky [9], і створення імерсивних ігрових середовищ. Обмеження, такі як громіздкість проводів і обмежена функціональність двох сторін, можуть бути подолані через впровадження бездротових технологій і гнучких датчиків, як зазначено у [5].

Перспективи масштабування системи передбачають інтеграцію штучного інтелекту для обробки даних про рухи, що може сприяти розвитку адаптивних

гуманоїдних робіт. Такі технології, ймовірно, стануть основою для майбутніх інтерфейсів, дозволяючи операторам зосереджуватися на завданнях вищого порядку, подібно до роботів типу Sarcos Guardian S. Розробка тонких костюмів і вдосконалення алгоритмів відкриває шлях до створення природних і доступних систем керування, які трансформують взаємодію людини з технологіями. Результати роботи свідчать про те, що КФС є ефективним інструментом для реалізації інноваційних інтерфейсів, здатних задовольнити потреби освіти, промисловості та розважальної сфери.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ


1. Scientific journal PHYSICAL AND MATHEMATICAL EDUCATION Has been issued since 2013. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://repository.sspu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/d39ce87e-8cd6-47cc-a84e-b573fbca5113/content
2. Young, A. J., Ferris, D. P. State of the Art and Future Directions for Lower Limb Robotic Exoskeletons. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2017, Vol. 25 (2), pp. 171–182. Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/document/7456920
3. Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., Oriolo, G. Robotics: Modelling, Planning and Control. London: Springer, 2009. 632 p.
4. Jimenez, M., Palomera, R., Couvertier, I. Introduction to Embedded Systems: Using ANSI C and the Arduino Development Environment. New York: Springer, 2014. 660 p.
5. Sarajchi, M., Al-Hares, M. K., Sirlantzis, K. Wearable Lower-Limb Exoskeleton for Children With Cerebral Palsy: A Systematic Review of Mechanical Design, Actuation Type, Control Strategy, and Clinical Evaluation. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2021, Vol. 29, pp. 1303–1320. Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/document/9348190
6. Monk, S. Programming Arduino: Getting Started with Sketches. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2023. 208 p. Режим доступу: https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781264676989
7. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, Vol. 15 (4), pp. 2405–2415. Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/document/8477101
8. Strickland, E. Demo: A Versatile Snake Robot That Masters Tough Terrain and Climbs Metal Walls. IEEE Spectrum, 2017. Режим доступу: https://spectrum.ieee.org/demo-sarcos-snake-robot
9. Коба О. Call of the Sky: Освітній проєкт з робототехніки / О. Коба. – К.: Видавництво НТУУ КПІ, 2023. – 120 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://robotdreams.cc/uk/blog/506-pershyy-v-ukrayini-symulyator-rozvidky-ta-koryhuvannya
10. Офіційний вебсайт Arduino, документація, навчальні посібники, програмне забезпечення (Arduino IDE). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.arduino.cc/
11. X. Hou, J. Wang, C. Jiang, Z. Meng, J. Chen and Y. Ren, "Efficient Federated Learning for Metaverse via Dynamic User Selection, Gradient Quantization and Resource Allocation,". [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10368103&isnumber=10474539

12. S. K. Jagatheesaperumal and M. Rahouti, "Building Digital Twins of Cyber Physical Systems With Metaverse for Industry 5.0 and Beyond,". [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10017413&isnumber=10017402

13. S. K. Jagatheesaperumal et al., "Semantic-Aware Digital Twin for Metaverse: A Comprehensive Review,". [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10251844&isnumber=10251842

14. Lee, J., & Kundu, P. (2022). Integrated cyber-physical systems and industrial metaverse for remote manufacturing. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213846322001833?via%3Dihub

15. Lyu, Z., & Fridenfalk, M. (2023). Digital twins for building industrial metaverse. Journal of Advanced Research. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123223003594?via%3Dihub

16. Welch, G., Bishop, G. An Introduction to the Kalman Filter. University of North Carolina at Chapel Hill, Department of Computer Science, Technical Report TR 95-041, 2023. Режим доступу: https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf

17. McRoberts, M. Arduino Robot Bonanza. New York: McGraw-Hill Education, 2021. Режим доступу: https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071782777

18. Lampa.kpi.ua, 2023. Режим доступу: https://lampa.kpi.ua/resources/complementary-filter-mpu6050

19. Z. Meng et al., "Task-Oriented Cross-System Design for Timely and Accurate Modeling in the Metaverse,". [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10370739&isnumber=10454609

20. Mourad, N., et al. (2024). Optimising control engineering tools using digital twin capabilities and other cyber-physical metaverse manufacturing system components. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10292573&isnumber=10510045

21. Dafarra, S., et al. (2024). iCub3 avatar system: Enabling remote fully immersive embodiment of humanoid robots. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.adh3834

22. Zhou, H., et al. (2023). Revitalizing Human-Robot Interaction: Phygital Twin Driven Robot Avatar for China–Sweden Teleoperation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://cjme.springeropen.com/articles/10.1186/s10033-023-00956-9

23. Spanlang, B., et al. (2014). How to build an embodiment lab: achieving body representation illusions in virtual reality. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2014.00009/full

24. Gonzalez-Franco, M., & Peck, T. C. (2018). Avatar embodiment. Towards a standardized questionnaire. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2018.00074/full

25. Takeuchi, K., et al. (2020). Avatar work: Telework for disabled people unable to go outside by using avatar robots. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://dl.acm.org/doi/10.1145/3371382.3380737

26. Song, H., Rawat, D. B., Jeschke, S., Brecher, C. Cyber-Physical Systems: Foundations, Principles and Applications. Amsterdam: Elsevier, 2016. 514 p.

27. GitHub, універсальна бібліотека [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://github.com/RTIMULib/RTIMULib-Arduino

28. Взаємодія MPU 6050 з Arduino [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://mikrotik.kpi.ua/index.php/courses-list/category-arduino/38-mpu-6050

29. Батрак О. В., Торошанко Я. І. особливості застосування машинного навчання на мікроконтролерах arduino для обробки даних mpu-6050. Сучасні інтелектуальні інформаційні технології в науці та освіті : V Всеукр. Науково-практ. конф., м. Київ, 18 травня. 2025 р. Київ, 2025. – Подано на друкування.

30. Батрак О. В., Торошанко Я. І. інтеграція python і unity для синхронізації рухів у кіберфізичних системах. Сучасні інтелектуальні інформаційні технології в науці та освіті : V Всеукр. Науково-практ. конф., м. Київ, 19 травня. 2025 р. Київ, 2025. – Подано на друкування.

**Додаток А**

# ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ
# (ПРЕЗЕНТАЦІЯ)

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій**
**Кафедра Компютерної інженерії**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА

# на тему: «Симулятор кіберфізичної системи для навчання на основі моделі взаємодії між фізичними та віртуальними компонентами»

Виконав: студент групи КІД-42

Батрак Олександр Володимирович

Керівник кваліфікаційної роботи:

Торошанко Ярослав Іванович,

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник*

Київ 2025

*Мета роботи* - Розробити економічну кіберфізичну систему для синхронізації рухів руки з аватаром і маніпулятором.

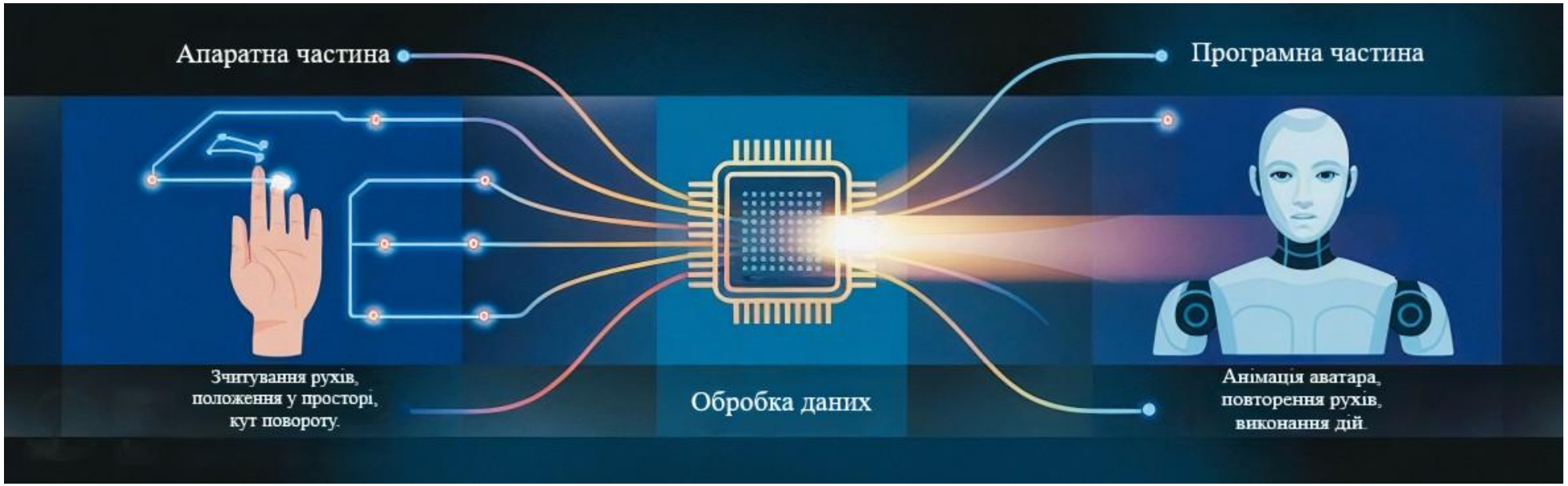
*Об'єкт дослідження* – Дослідження кіберфізичних системи в робототехніці.

*Предмет дослідження* – Симулятор із двосторонньою взаємодією реального та віртуального роботів.

# Актуальність теми

В наш час розробка кіберфізичних систем для синхронізації рухів із використанням простих комплектуючих є актуальною через зростання попиту на економічні IoT-рішення в автоматизації, освіті та розвагах. Інтеграція апаратного забезпечення з різними програмними платформами, дозволяє створювати доступні прототипи низької вартості з високою точністю (±5°) і низькою затримкою, що відповідає сучасним вимогам до реального часу. Тема покращення розвитку адаптивних технологій для промислових і побутових продуктів.

# Структура кіберфізичної системи



# Апаратне забезпечення




MPU-6050 – акселерометр і гіроскоп, 6DOF




Arduino Uno - мікроконтроллер, обробляє сигнал MPU-6050 через I2C, керує SG90 через ШІМ.



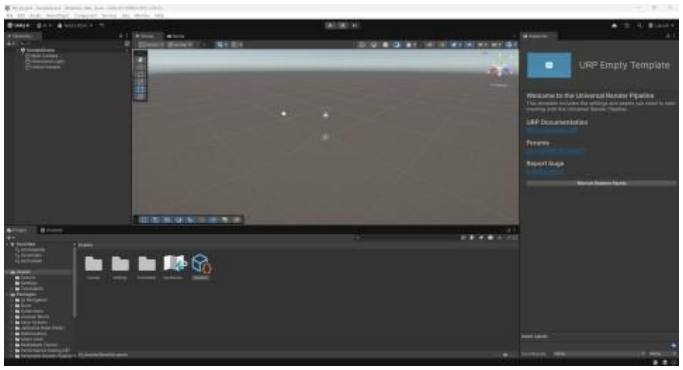
SG90 - сервопривод на 2кг з поворотом на 180°

# Програмне забезпечення

Unity:

Інтерфейс та анімація.

SerialPort для зв’язку з Arduino.

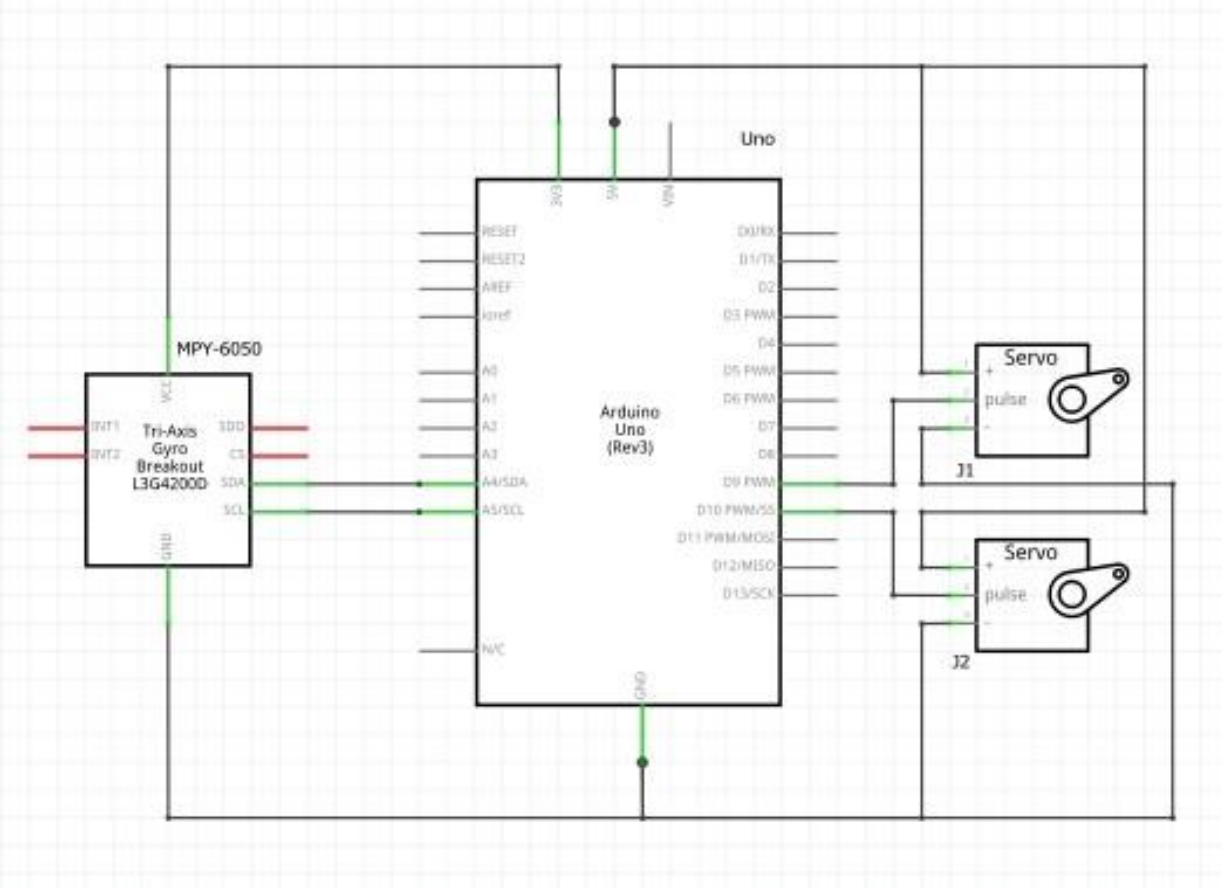



Arduino IDE:

Розробка коду під мікроконтроллер для приймання та надсиалння данних на MPU-6050 та SG90.

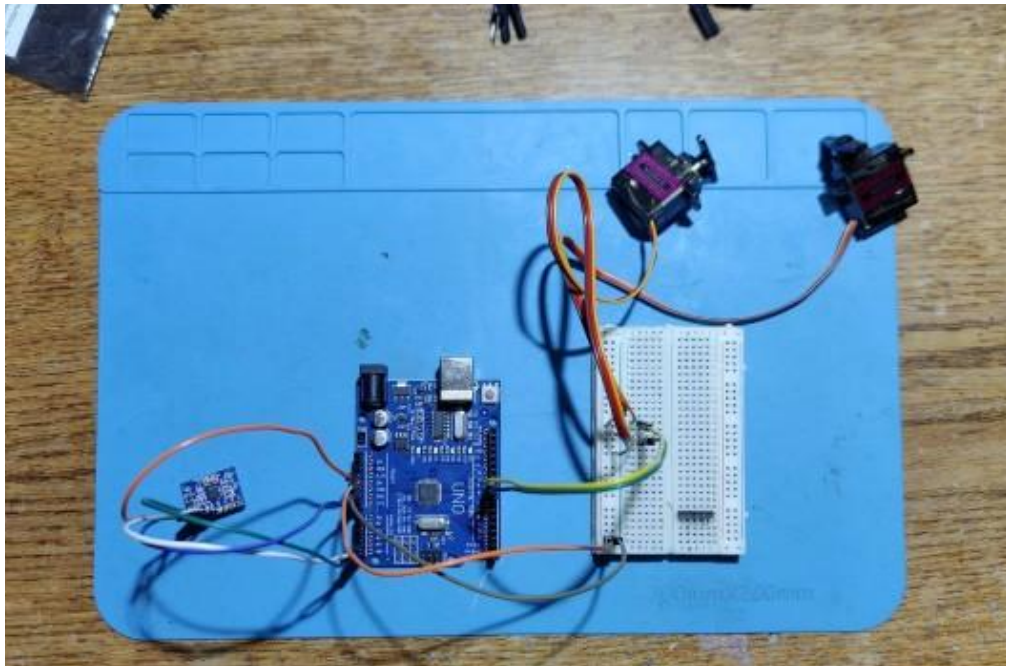


# Принципова схема



# Вибір компонентів

Arduino Uno вибрано за доступність і простоту програмування. MPU-6050 забезпечує точне зчитування рухів (±5° після фільтрації) за низької вартості . SG90 обрано за достатній момент (1.8 кг·см) і економічність , що відповідає вимогам економічного прототипу.



Компоненти підключені по схемі

# Створений код під Arduino Uno для взаємодії компонентів між собою.

Представлений код, що забезпечує обробку даних із датчика MPU-6050 і керування сервоприводами SG90. Використовується додатковий фільтр для підвищення точності (±5°) і послідовний порт для передачі даних в Unity. Код є основою двосторонньої взаємодії системи із затримкою.



# Основні результати прототипу

- Прототип низької вартості.
- Реалізовано синхронізацію рухів руки з аватаром і маніпулятором.
- Точність кутів ±5°.
- Забезпечено двосторонню взаємодію з затримкою <100 мс.
- Створено інтерфейс Unity для відображення кутів.

# Альтернативи для вибраних компонентів

| Компонент | Функція | Альтернативи |
|---|---|---|
| Arduino Uno | Обробка даних | Nano, STM32, ESP32 |
| MPU-6050 | Зчитування рухів | BNO055, MPU-9250 |
| SG90 | Рух маніпулятора | MG90S, Dynamixel |
| Unity | Анімація аватара | Unreal, Godot |

# Перспективи розвитку

Подальший розвиток кіберфізичних систем із Arduino, передбачає впровадження бездротового зв’язку для підвищення мобільності та інтеграції машинного навчання  для адаптивного керування аватарами. Оптимізація алгоритмів фільтрації і використання гнучких датчиків у тонких костюмах це розширить застосування в медицині, віртуальній реальност, промисловій автоматизації та військових цілях. Це сприятиме створенню масштабованих і доступних IoT-систем із мінімальними витратами.

# Висновки

У роботі розроблено кіберфізичну систему для керування віртуальними аватарами та роботизованою рукою. Створено економічний прототип, що забезпечує синхронізацію рухів руки з аватаром і маніпулятором. Реалізовано двосторонню взаємодію з точністю кутів ±5° і затримкою <100 мс. Проведено аналіз апаратних компонентів (Arduino Uno, MPU-6050, SG90) та програмного забезпечення (Unity, Arduino IDE). Обґрунтовано вибір компонентів через порівняння з альтернативами (STM32, BNO055, Dynamixel). Визначено обмеження системи, зокрема шум MPU-6050, обмежену потужність SG90 і провідний зв’язок, та запропоновано шляхи їх подолання. Досліджено перспективи розвитку: створення тонкого костюма з гнучкими датчиками, інтеграція ШІ для адаптивного керування. Виявлено потенційні напрями застосування системи в освіті, промисловості та розвагах.