Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
(повна назва)
Кафедра Комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розроблення цифрового двійника для оптимізації роботи робототехнічного маніпулятора
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТАКІТ-22-1
Андрій БЕРБЕНЕЦЬ
(власне ім’я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)

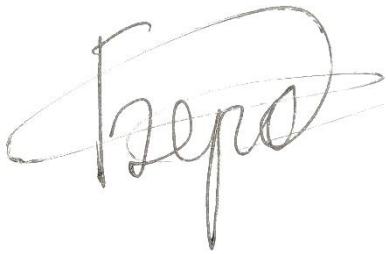
Керівник проф. Сергій НОВОСЕЛОВ
(посада, власне ім’я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАРБІ _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім’я, прізвище)

2026 р.

Я, Бербенець Андрій Віталійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

" 06 " липня 2026 р.  Андрій БЕРБЕНЕЦЬ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та систем
Кафедра Комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«27» квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
здобувачеві Бербенець Андрію Віталійовичу
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення цифрового двійника для оптимізації роботи робототехнічного маніпулятора
затверджена наказом університету від 04.06.2026 р. № 472 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 17.07.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи 3.1 Програмне забезпечення для моделювання Unity 3D; 3.2 Маніпулятор FANUC M-10IA/8L

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Аналіз технічного завдання; 4.2 Розробка архітектури та розрахунки цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10IA/8L; 4.3 Програмна реалізація цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10IA/8L

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt). – 14 с.ф. А 4.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	27.04.26-30.04.26	виконано
2	Розробка архітектури та розрахунки цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10IA/8L	01.05.26-22.05.26	виконано
3	Програмна реалізація цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10IA/8L	23.05.26-19.06.26	виконано
4	Тестування та аналіз ефективності підсистеми	20.06.26-29.06.26	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	30.06.26-02.07.26	виконано
6	Подання роботи на нормоконтроль	03.07.26-05.07.26	виконано
7	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unicheck	06.07.26-12.07.26	виконано
8	Подання роботи на рецензію	13.07.26-14.07.26	виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	151.07.26-16.07.26	виконано
10	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	17.07.26	виконано

Дата видачі завдання 27.04.2026 р.

Здобувач _____ Андрій БЕРБЕНЕЦЬ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ проф. Сергій НОВОСЕЛОВ
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 65 с., 8 табл., 16 рис., 2 дод., 21 джерел.

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, РОБОТОТЕХНІЧНИЙ МАНІПУЛЯТОР, FANUC M-10IA/8L, UNITY 3D, КІНЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МОДЕЛЮВАННЯ.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення цифрового двійника робототехнічного маніпулятора для підвищення ефективності його функціонування шляхом оптимізації параметрів керування, аналізу робочих режимів та прогнозування поведінки системи в реальному часі.

Об’єктом розробки є процес функціонування робототехнічного маніпулятора в умовах виконання виробничих або технологічних операцій.

Предметом розробки є методи та засоби створення цифрового двійника робототехнічного маніпулятора, алгоритми моделювання його поведінки, а також способи оптимізації режимів роботи на основі отриманих даних.

У роботі проведено аналіз принципів побудови цифрових двійників, архітектур промислових кіберфізичних систем, сучасних робототехнічних маніпуляторів, методів синхронізації та програмних засобів їх реалізації. Обґрунтовано вибір маніпулятора FANUC M-10iA/8L як об'єкта дослідження, сформульовано вимоги до системи та розроблено архітектуру цифрового двійника. Також виконано розрахунок геометричної та кінематичної моделей маніпулятора. Розроблено програмне забезпечення цифрового двійника в середовищі Unity 3D, створено тривимірну модель маніпулятора та реалізовано механізми керування його рухами. Проведено експериментальні дослідження, які підтвердили коректність роботи програмної реалізації, точність відтворення кінематики та можливість використання цифрового двійника для моделювання, тестування й оптимізації роботи робототехнічного маніпулятора.

ABSTRACT

Explanatory note: 65 p., 8 tables, 16 figures, 2 appendices, 21 sources.

DIGITAL DOUBLE, ROBOTIC MANIPULATOR, FANUC M-10IA/8L, UNITY 3D, KINEMATIC MODEL, CYBER-PHYSICAL SYSTEM, MODELING.

The purpose of the qualification work is to develop a digital double of a robotic manipulator to increase the efficiency of its operation by optimizing control parameters, analyzing operating modes and predicting the behavior of the system in real time.

The object of development is the process of functioning of a robotic manipulator in the conditions of performing production or technological operations.

The subject of development is methods and means of creating a digital twin of a robotic manipulator, algorithms for modeling its behavior, as well as methods for optimizing operating modes based on the data obtained.

The work analyzes the principles of building digital twins, architectures of industrial cyber-physical systems, modern robotic manipulators, synchronization methods and software tools for their implementation. The choice of the FANUC M-10iA/8L manipulator as the object of research was justified, the requirements for the system were formulated and the architecture of the digital twin was developed. The geometric and kinematic models of the manipulator were also calculated. The software of the digital twin was developed in the Unity 3D environment, a three-dimensional model of the manipulator was created and mechanisms for controlling its movements were implemented. Experimental studies were conducted, which confirmed the correctness of the software implementation, the accuracy of kinematics reproduction and the possibility of using the digital twin for modeling, testing and optimizing the operation of the robotic manipulator.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень 9
Вступ 10
1 Аналіз та обґрунтування підходів до розроблення цифрового двійника робототехнічного маніпулятора 12
1.1 Аналіз принципів побудови та класифікації цифрових двійників 12
1.2 Аналіз архітектур цифрових двійників у промислових системах 14
1.3 Аналіз сучасних робототехнічних маніпуляторів та обґрунтування вибору FANUC M-10iD/8L 21
1.4 Аналіз методів синхронізації та архітектур реального часу у кіберфізичних системах 23
1.5 Аналіз програмних засобів реалізації цифрового двійника 24
1.6 Постановка задач 26
2 Розробка архітектури та розрахунки цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10IA/8L 28
2.1 Розробка архітектури двійника маніпулятора FANUC M-10ia/8L 28
2.2 Розрахунок геометричної моделі 30
2.3 Розрахунок кінематичної моделі 35
3 Програмна реалізація цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10IA/8L 38
3.1 Аналіз технічних та габаритних параметрів маніпулятора M-10iA/8L 38
3.2 Розробка 3D моделі цифрового близнюка маніпулятора M-10iA/8L у Unity 3D 40
3.3 Програмна реалізація цифрового двійника 44
3.4 Постановка задач експерименту 48
3.5 Проведення експерименту та аналіз отриманих результатів 50
3.6 Охорона праці 55
Висновки 57

Перелік джерел посилання 59
Додаток А Код програми 62
Додаток Б Демонстраційний матеріал 64

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

NTP – network time protocol;

PTP – precision time protocol;

RTOS – real-time операційних систем.

ВСТУП

Актуальність теми зумовлена стрімким розвитком автоматизації виробничих процесів та впровадженням концепції Індустрії 4.0, де робототехнічні маніпулятори відіграють ключову роль у виконанні точних і повторюваних операцій. Водночас ефективність їх роботи значною мірою залежить від якості налаштування, оптимізації режимів функціонування та здатності адаптуватися до змінних умов. Традиційні підходи до налаштування та тестування потребують значних часових і матеріальних витрат, а також можуть супроводжуватися ризиком пошкодження обладнання.

У даному контексті застосування цифрових двійників є перспективним напрямом, що дозволяє створити віртуальну модель маніпулятора, яка відтворює його поведінку в реальному часі, що відкриває можливості для проведення безпечних експериментів, аналізу різних сценаріїв роботи, оптимізації алгоритмів керування та прогнозування можливих відмов. Розроблення цифрового двійника сприяє підвищенню ефективності, надійності та гнучкості роботизованих систем, що робить дану тему актуальною в умовах сучасного розвитку промисловості.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення цифрового двійника робототехнічного маніпулятора для підвищення ефективності його функціонування шляхом оптимізації параметрів керування, аналізу робочих режимів та прогнозування поведінки системи в реальному часі.

Об’єктом розробки є процес функціонування робототехнічного маніпулятора в умовах виконання виробничих або технологічних операцій.

Предметом розробки є методи та засоби створення цифрового двійника робототехнічного маніпулятора, алгоритми моделювання його поведінки, а також способи оптимізації режимів роботи на основі отриманих даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

– проаналізувати сучасні робототехнічні маніпулятори та існуючі підходи до створення цифрових двійників;

– проаналізувати методи математичного моделювання та опису кінематики і динаміки маніпулятора;

– розробити математичну модель робототехнічного маніпулятора;

– розробити програмну реалізацію цифрового двійника з урахуванням параметрів реального об’єкта;

– забезпечити взаємодію між фізичним маніпулятором та його цифровою моделлю;

– розробити та реалізувати алгоритми оптимізації режимів роботи маніпулятора;

– провести моделювання та експериментальні дослідження для оцінки ефективності розробленого рішення;

– проаналізувати отримані результати та сформувати рекомендації щодо практичного застосування цифрового двійника.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008–15 [1], методичних вказівок [2], а результати можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме 9.5.

1 АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПІДХОДІВ ДО РОЗРОБЛЕННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА РОБОТОТЕХНІЧНОГО МАНІПУЛЯТОРА

1.1 Аналіз принципів побудови та класифікації цифрових двійників

Цифровий двійник є сучасною концепцією, що передбачає створення віртуальної копії фізичного об’єкта, процесу або системи, яка відображає їхній стан, поведінку та характеристики в режимі, наближеному до реального часу. Основною метою цифрового двійника є забезпечення можливості аналізу, моделювання та оптимізації роботи об’єкта без прямого втручання у фізичну систему, цей підхід дозволяє значно знизити витрати на експерименти та підвищити ефективність прийняття рішень.

Цифровий двійник є складовою частиною кіберфізичних систем і тісно пов’язаний із розвитком концепції Індустрії 4.0. Його функціонування базується на постійному обміні даними між фізичним об’єктом та його цифровою моделлю. Завдяки використанню сенсорів, систем збору даних і мережевих технологій забезпечується актуалізація параметрів моделі, що дозволяє відображати реальний стан об’єкта з високою точністю.

Основними принципами побудови цифрового двійника є адекватність, актуальність, масштабованість та інтегрованість. Принцип адекватності передбачає відповідність цифрової моделі реальному об’єкту за ключовими характеристиками. Актуальність означає своєчасне оновлення даних та підтримку синхронізації. Масштабованість забезпечує можливість розширення системи, а інтегрованість – здатність взаємодіяти з іншими інформаційними системами та платформами [3].

Структура цифрового двійника зазвичай включає три основні компоненти: фізичний об’єкт, цифрову модель та канал обміну даними між ними. Фізичний об’єкт є джерелом первинної інформації, цифрова модель виконує функції аналізу та прогнозування, а комунікаційна інфраструктура забезпечує передачу

даних, така триєдина структура дозволяє реалізувати замкнений цикл управління та оптимізації.

Залежно від рівня складності та функціональних можливостей цифрові двійники поділяються на декілька типів. Найпростішим є цифровий прототип, який використовується на етапі проєктування та не має постійного зв’язку з реальним об’єктом. Далі виділяють цифровий тіньовий двійник, який отримує дані від фізичної системи, але не впливає на неї, найбільш розвиненим є повноцінний цифровий двійник, який забезпечує двосторонній обмін даними та може впливати на роботу реального об’єкта [4].

Також цифрові двійники класифікуються за рівнями зрілості, які визначають ступінь їх інтеграції та функціональності. На початковому рівні модель використовується лише для візуалізації, на середньому – для аналізу та діагностики, а на високому – для прогнозування та автономного управління. Підвищення рівня зрілості супроводжується зростанням складності моделей та вимог до обчислювальних ресурсів.

Важливим аспектом є застосування цифрових двійників у промисловості, де вони використовуються для оптимізації виробничих процесів, підвищення якості продукції та зниження експлуатаційних витрат. Зокрема, у робототехніці цифрові двійники дозволяють моделювати рухи маніпуляторів, тестувати алгоритми керування та оцінювати ефективність різних режимів роботи без ризику для обладнання.

Цифровий двійник є потужним інструментом цифрової трансформації, який забезпечує інтеграцію фізичних і цифрових систем, підвищує ефективність управління та створює нові можливості для оптимізації складних технічних об’єктів. Його використання є перспективним напрямом розвитку сучасних інженерних систем, зокрема у сфері робототехніки [5].

1.2 Аналіз архітектур цифрових двійників у промислових системах

Архітектура цифрового двійника в промислових системах визначає спосіб організації взаємодії між фізичним об’єктом, цифровою моделлю та інформаційною інфраструктурою. Вона є багаторівневою структурою, яка забезпечує збір, передачу, обробку та аналіз даних у режимі реального часу. Основною вимогою до такої архітектури є забезпечення безперервної синхронізації між фізичною та цифровою складовими, що дозволяє реалізувати функції моніторингу, прогнозування та оптимізації.

Однією з базових архітектур є трирівнева модель, яка включає фізичний рівень, рівень цифрового двійника та рівень застосунків. Фізичний рівень містить обладнання, сенсори та виконавчі механізми, що генерують дані. Рівень цифрового двійника відповідає за моделювання та обробку інформації, тоді як прикладний рівень забезпечує візуалізацію, аналітику та підтримку прийняття рішень. Така структура дозволяє організувати двосторонній обмін даними між реальним об’єктом і його цифровою копією [6]. На рисунку 1.1 показано приклад узагальненої архітектури цифрового двійника для промислового виробництва.

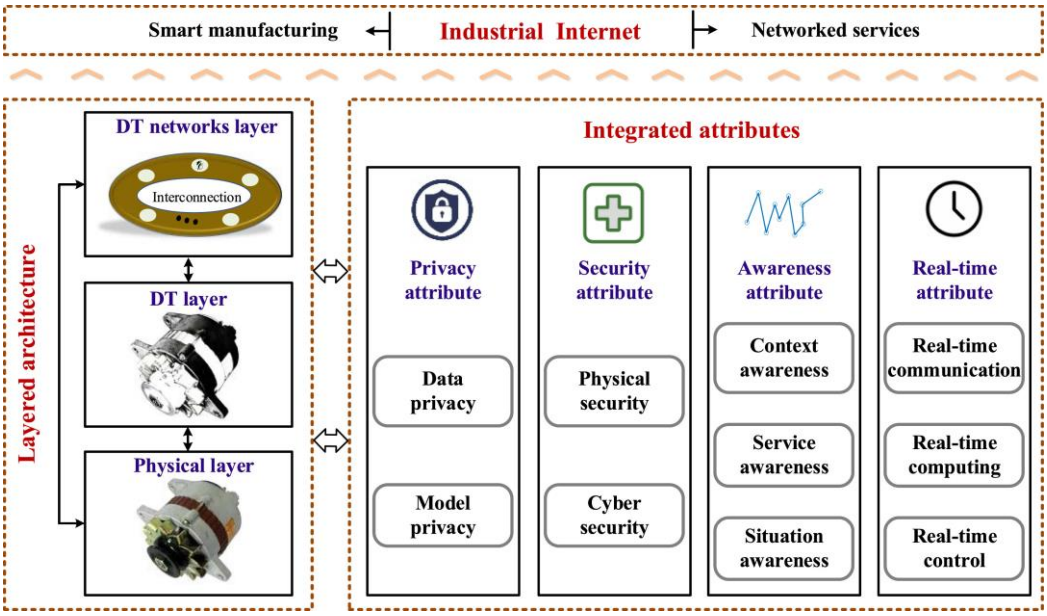


Рисунок 1.1 – Приклад узагальненої архітектури цифрового двійника для промислового виробництва [6]

Приклад демонструє ключові компоненти: фізичні активи, сенсорні системи, канали передачі даних, обчислювальні модулі та аналітичні сервіси. Стрілки між компонентами відображають потоки даних, що формують замкнений цикл керування та зворотного зв’язку.

Більш розширеним підходом є багаторівнева (layered) архітектура, яка деталізує процес обробки даних, приклад якої показано на рисунку 1.2. Наприклад, у сучасних промислових рішеннях виділяють такі рівні: фізичний, сенсорний, мережевий, рівень управління даними, аналітичний та прикладний. Така шестирівнева модель дозволяє розділити функції збору даних, їх передачі, зберігання та аналізу, що підвищує гнучкість і масштабованість системи [7].

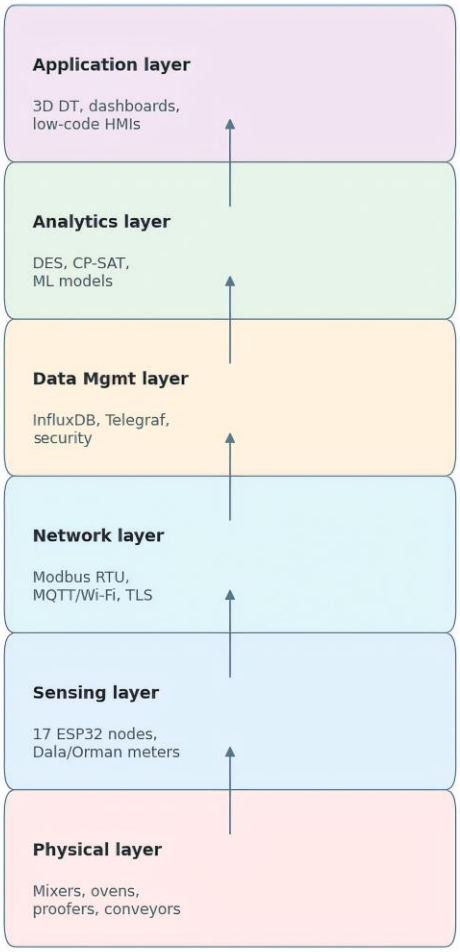


Рисунок 1.2 – Приклад шестирівневої моделі архітектури [7]

Ще одним поширеним підходом є архітектура на основі IoT та хмарних технологій, де значна частина обчислень виконується у хмарі або на edge-

пристроях. У цьому випадку сенсори передають дані через мережу до обчислювальної платформи, де здійснюється їх обробка, зберігання та аналіз із використанням алгоритмів машинного навчання, така архітектура забезпечує високу обчислювальну потужність і можливість інтеграції з іншими інформаційними системами підприємства [8].

На рисунку 1.3 показано приклад багаторівневої архітектури цифрового двійника, де кожен рівень виконує окрему функцію: від збору даних із фізичних пристроїв до їх аналітики та відображення у вигляді 3D-візуалізації або інформаційних панелей, така структура забезпечує ієрархічну організацію системи та ефективний розподіл обчислювальних ресурсів.

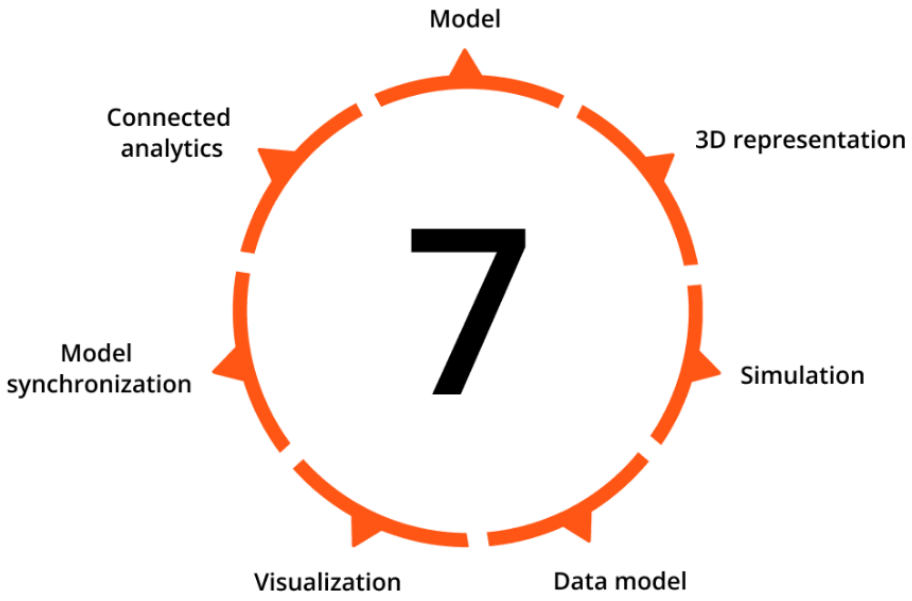


Рисунок 1.3 – Приклад багаторівневої архітектури цифрового двійника [8]

У промислових кіберфізичних системах також застосовується мережево-орієнтована архітектура цифрових двійників, де декілька двійників можуть взаємодіяти між собою, утворюючи єдину систему. У цьому випадку формується мережа цифрових двійників, яка відображає складні виробничі процеси або цілі виробничі лінії. Такий підхід дозволяє моделювати взаємодію між різними компонентами системи та оптимізувати їхню спільну роботу.

Важливим аспектом архітектури є також організація потоків даних та забезпечення реального часу. Для цього використовуються промислові протоколи передачі даних, системи обробки потокових даних та механізми синхронізації. Забезпечення низьких затримок і високої надійності передачі даних є критичним для коректного функціонування цифрового двійника, особливо у задачах керування робототехнічними системами.

Архітектури цифрових двійників у промислових системах можуть відрізнятися за складністю, рівнем деталізації та способом реалізації, проте всі вони базуються на спільних принципах: інтеграції фізичного та цифрового середовища, використанні даних у реальному часі та забезпеченні зворотного зв’язку. Вибір конкретної архітектури залежить від вимог до системи, масштабів виробництва та поставлених задач, що є важливим при розробленні цифрового двійника робототехнічного маніпулятора [9].

На початковому етапі розроблення цифрового двійника необхідно визначитися з архітектурою механічної частини маніпулятора, оскільки саме вона визначає складність побудови математичних моделей прямої та оберненої кінематики. Від типу кінематичної структури безпосередньо залежить складність моделювання, точність симуляції та обчислювальні витрати при реалізації цифрового двійника.

У сучасній промисловості найбільш поширеними є три типи робототехнічних архітектур: артикульовані (послідовна кінематика), SCARA та Delta (паралельна кінематика). Кожна з них має принципово різну конструкцію, робочу область та область застосування, що обумовлює доцільність їх використання в різних виробничих задачах.

Артикульовані роботи мають послідовну кінематичну структуру та складаються з обертових шарнірів, що імітують рухи людської руки, що забезпечує високу гнучкість, можливість роботи у складному просторі та виконання операцій із довільною орієнтацією інструмента, зовнішній вигляд таких роботів показано на рисунку 1.4.



а) б) в)

а) FANUC; б) ABB; в) KUKA

Рисунок 1.4 – Артикульовані роботи [10]

Основною перевагою є універсальність і здатність обходити перешкоди, однак це досягається за рахунок складнішої математичної моделі та більшої інерційності системи, саме цей тип роботів є найбільш придатним для створення цифрового двійника, орієнтованого на гнучке виробництво [10].

SCARA-роботи мають обмежену кінематику, орієнтовану переважно на рух у горизонтальній площині, вони характеризуються високою жорсткістю по осі Z та ефективні для задач складання, вставки компонентів та переміщення об’єктів, на рисунку 1.5 показано зовнішній вигляд SCARA-роботу.

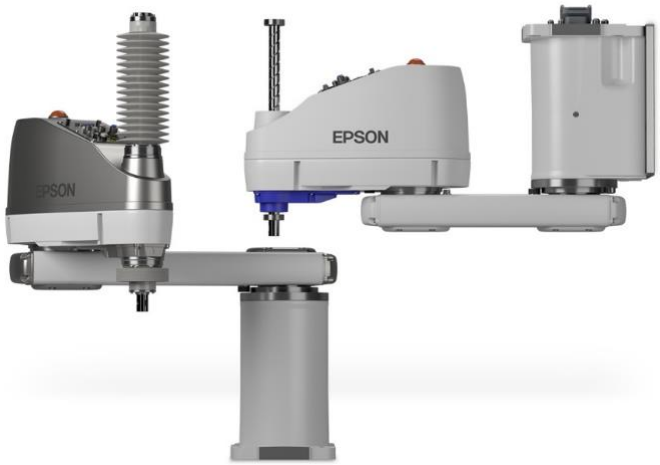


Рисунок 1.5 – SCARA-робот EPSON GX-series [11]

Їхньою перевагою є висока швидкість і точність у межах обмеженої робочої області, водночас вони практично не здатні виконувати складні просторові маніпуляції, що обмежує їх використання у задачах, де потрібна універсальність [11].

Delta-роботи базуються на паралельній кінематиці, де всі приводи розташовані на нерухомій основі, що дозволяє значно зменшити масу рухомих частин і досягати дуже високих швидкостей. На рисунку 1.6 представлено зовнішній вигляд Delta-роботу.



Рисунок 1.6 – Delta-робот ABB FlexPicker IRB 360 [12]

Основною перевагою є швидкість (до сотень циклів за хвилину), однак це супроводжується обмеженою вантажопідйомністю, складною математичною моделлю та зменшенням точності на краях робочої зони, крім того, можливості орієнтації об’єктів є обмеженими [12]. Для більш наочного аналізу доцільно представити ключові характеристики різних типів маніпуляторів у вигляді порівняльної таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння типів робототехнічних маніпуляторів

Критерій	Артикульовані (6-осьові)	SCARA	Delta
1	2	3	4
Тип кінематики	Послідовна	Послідовна	Паралельна

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4
Кількість ступенів свободи	6	4	3 – 4
Робоча зона	Просторова (3D)	Циліндрична	Куполоподібна
Гнучкість	Висока	Середня	Низька
Швидкість	Середня	Висока	Дуже висока
Вантажопідйомність	Висока	Середня	Низька
Точність	Висока	Висока	Середня
Складність моделі	Висока	Середня	Висока
Основне застосування	Універсальні задачі	Складання	Сортування, пакування

Для реалізації цифрового двійника було обрано три представники артикульованих роботів середнього класу: ABB IRB 1200-7/0.7, KUKA KR 10 CYBERTECH nano та FANUC M-10iD/8L, вони мають схожу кінематику, але відрізняються за ключовими технічними характеристиками, як показано в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння обраних маніпуляторів

Характеристика	ABB IRB 1200-7/0.7	KUKA KR 10 CYBERTECH nano	FANUC M-10iD/8L
Кількість осей	6	6	6
Вантажопідйомність, кг	7	10	8
Максимальний виліт, мм	703	1440	2032
Повторюваність, мм	± 0,02	± 0,04	± 0,03
Маса, кг	54	149	180

Порівняльний аналіз показує, що SCARA та Delta-роботи є високоефективними у вузькоспеціалізованих задачах, однак мають суттєві

обмеження щодо гнучкості та універсальності. У свою чергу, артикульовані маніпулятори забезпечують оптимальний баланс між швидкістю, точністю та функціональністю, що робить їх найбільш придатними для задач цифрового двійника. Серед розглянутих моделей найбільш доцільним для подальшої реалізації є FANUC M-10iD/8L, оскільки він має найбільший робочий радіус, достатню вантажопідйомність і забезпечує необхідну універсальність для моделювання широкого спектра виробничих операцій [13].

1.3 Аналіз сучасних робототехнічних маніпуляторів та обґрунтування вибору FANUC M-10iD/8L

Сучасні промислові робототехнічні маніпулятори середнього класу представлені великою кількістю моделей від провідних виробників, серед яких особливо виділяються ABB, KUKA та FANUC. Дані компанії формують основу світового ринку промислової робототехніки та пропонують рішення для широкого спектра задач – від точного складання до високошвидкісного переміщення вантажів. Найбільш типовими представниками даного класу є ABB IRB 1200, KUKA KR 10 CYBERTECH nano та FANUC M-10iD/8L.

Робот ABB IRB 1200 орієнтований на компактні виробничі осередки, де важливими є точність і мала габаритність. Він демонструє високу повторюваність і добре підходить для задач машинного обслуговування та дрібного складання. Його конструкція оптимізована для роботи в обмеженому просторі, однак має менший робочий радіус у порівнянні з конкурентами, що може обмежувати універсальність застосування [14].

KUKA KR 10 CYBERTECH nano відзначається більшою гнучкістю робочої зони та підвищеним показником досяжності. Завдяки компактній кінематичній структурі та високій динаміці він ефективно використовується у задачах зварювання, пакування та загальної автоматизації виробництва. Водночас більша маса та складніша кінематика можуть ускладнювати побудову цифрової моделі та підвищувати вимоги до обчислювальних ресурсів [15].

FANUC M-10iD/8L є представником високошвидкісних 6-осьових маніпуляторів, що поєднують в собі великий робочий радіус, високу точність та стабільну динаміку руху. Завдяки збільшеному виліту (до 2032 мм) дана модель забезпечує ширшу робочу зону порівняно з аналогами, що є критично важливим для універсальних виробничих осередків [16].

З точки зору цифрового моделювання, важливим фактором є стабільність кінематичної структури та наявність передбачуваної динаміки руху. FANUC M-10iD/8L має добре документовану кінематику та широко підтримується в промислових симуляційних середовищах, що спрощує побудову цифрового двійника та інтеграцію з програмними платформами керування. Крім технічних характеристик, важливим критерієм є надійність та промислова поширеність. Роботи FANUC традиційно використовуються у масовому виробництві завдяки високій відмовостійкості та простоті інтеграції в існуючі виробничі лінії, що забезпечує широку доступність технічної документації та програмних інструментів для моделювання і керування.

Порівняльний аналіз показує, що ABB та KUKA мають сильні сторони у спеціалізованих застосуваннях, однак FANUC M-10iD/8L забезпечує найкращий баланс між робочим простором, динамікою руху та універсальністю використання. Це робить його більш придатним для задач побудови цифрового двійника, де важлива не лише точність, але й можливість моделювання широкого спектра сценаріїв роботи. Для подальшої реалізації цифрового двійника було обґрунтовано вибір саме FANUC M-10iD/8L як базового об’єкта дослідження, оскільки він дозволяє забезпечити оптимальне поєднання складності моделі, універсальності застосування та доступності інструментів для симуляції і програмної реалізації [14-16].

1.4 Аналіз методів синхронізації та архітектур реального часу у кіберфізичних системах

Кіберфізичні системи (Cyber-Physical Systems, CPS) являють собою інтеграцію фізичних об’єктів із цифровими обчислювальними компонентами, які взаємодіють через мережеву інфраструктуру. У контексті цифрових двійників ключовим аспектом таких систем є забезпечення синхронізації між фізичною та віртуальною моделлю в режимі, максимально наближеному до реального часу, що дозволяє коректно відображати стан об’єкта та забезпечувати точність аналітики й керування.

Основною задачею синхронізації у CPS є узгодження часових параметрів між різними компонентами системи. Оскільки дані надходять від сенсорів з різною затримкою та частотою, виникає необхідність у використанні механізмів часової корекції. Найпоширенішими підходами є використання глобального часу (time-stamping), синхронізації через мережеві протоколи та алгоритмів вирівнювання потоків даних.

Одним із базових методів є синхронізація на основі мережевого протоколу часу NTP (Network Time Protocol), який забезпечує узгодження годинників між пристроями через мережу. У промислових системах також широко використовується протокол PTP (Precision Time Protocol), що дозволяє досягати значно більшої точності синхронізації, необхідної для керування роботизованими системами та цифровими двійниками [17].

Архітектури реального часу в кіберфізичних системах поділяються на централізовані, децентралізовані та гібридні. У централізованих архітектурах усі дані обробляються на одному сервері, що спрощує управління, але створює ризики затримок та перевантаження системи. Децентралізовані архітектури розподіляють обчислення між вузлами мережі, підвищуючи масштабованість і стійкість до відмов.

Гібридні архітектури поєднують переваги обох підходів, використовуючи edge-комп’ютинг для попередньої обробки даних та хмарні сервіси для глибокої

аналітики. Такий підхід є найбільш ефективним для цифрових двійників робототехнічних систем, оскільки дозволяє зменшити затримки при керуванні та одночасно забезпечити складну аналітичну обробку. Важливим аспектом є також забезпечення детермінованості часу виконання операцій, що досягається за рахунок використання real-time операційних систем (RTOS). Такі системи гарантують виконання критичних задач у задані часові інтервали, що є особливо важливим для керування роботизованими маніпуляторами та синхронізації їх рухів із цифровим двійником.

Для передачі даних у реальному часі в CPS застосовуються промислові мережеві протоколи, такі як EtherCAT, PROFINET та Ethernet/IP. Вони забезпечують низькі затримки, високу пропускну здатність і детерміновану доставку пакетів, що критично важливо для синхронної роботи фізичної та цифрової системи. Ефективна реалізація цифрового двійника робототехнічного маніпулятора неможлива без використання сучасних методів синхронізації та правильно обраної архітектури реального часу. Поєднання точних часових протоколів, розподіленої обробки даних та детермінованих мережевих технологій забезпечує стабільну взаємодію між фізичним об’єктом і його цифровою моделлю в умовах промислової експлуатації [18].

1.5 Аналіз програмних засобів реалізації цифрового двійника

Сучасна реалізація цифрових двійників робототехнічних систем потребує використання спеціалізованих програмних середовищ, які забезпечують моделювання фізики, візуалізацію, обробку даних у реальному часі та інтеграцію з системами керування. Основними категоріями програмних засобів для створення цифрових двійників є робототехнічні симулятори, ігрові рушії, CAD/CAE системи та спеціалізовані платформи кіберфізичних систем.

До найбільш поширених робототехнічних симуляторів належать Gazebo, Webots, CoppeliaSim та MuJoCo. Вони забезпечують високу точність фізичного моделювання та тісну інтеграцію з ROS, що робить їх стандартом у наукових

дослідженнях робототехніки. Проте ці середовища мають обмеження у сфері візуалізації та інтерактивності, а також часто потребують складної конфігурації та високого порогу входу для розробника.

Інший клас програмних засобів представлений ігровими рушіями, серед яких найбільш популярними є Unity 3D та Unreal Engine. Вони спочатку не призначалися для робототехніки, однак завдяки розвитку бібліотек інтеграції (ROS-TCP, ROS#, ZeroSim та інші) стали активно використовуватися для створення цифрових двійників. Їх ключовою перевагою є високоякісна 3D-візуалізація, гнучкість програмування та підтримка інтерактивних сценаріїв [29].

Unity 3D має низку важливих переваг для реалізації цифрового двійника робототехнічного маніпулятора. Платформа забезпечує підтримку фізичного рушія (PhysX), роботу в режимі реального часу, а також можливість створення складних сцен із високим рівнем деталізації. Крім того, Unity широко використовується в дослідженнях цифрових двійників саме завдяки поєднанню реалістичної візуалізації та достатньої точності моделювання руху роботів.

Важливою перевагою Unity є також легка інтеграція з зовнішніми системами керування та протоколами обміну даними. Використання ROS-містків (ROS-TCP Connector, ROS#) дозволяє забезпечити зв’язок між фізичним маніпулятором і його цифровою моделлю, що є критично важливим для реалізації концепції цифрового двійника в реальному часі. Це робить Unity універсальним середовищем для кіберфізичних систем [19].

Мова програмування C# є базовою для Unity і забезпечує високу продуктивність, об’єктно-орієнтовану архітектуру та зручність реалізації складної логіки керування. Використання C# дозволяє реалізувати алгоритми кінематики, синхронізації даних, обробки сенсорної інформації та побудови логіки взаємодії між компонентами цифрового двійника в єдиному середовищі.

На відміну від спеціалізованих робототехнічних симуляторів, Unity забезпечує значно вищий рівень візуалізації та можливість створення інтерактивних інтерфейсів для моніторингу та керування системою. Це особливо важливо для задач цифрового двійника, де необхідно не лише моделювати

поведінку об’єкта, але й забезпечувати її наочне відображення та аналіз у режимі реального часу.

Порівняльний аналіз показує, що Gazebo та подібні середовища є більш точними з точки зору фізичного моделювання, однак поступаються у гнучкості та візуалізації. Натомість Unity 3D забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю, інтерактивністю та можливістю швидкої розробки складних сцен, що робить його більш придатним для реалізації цифрового двійника робототехнічного маніпулятора.

Для реалізації даної кваліфікаційної роботи обґрунтовано вибір програмного стеку Unity 3D у поєднанні з мовою програмування C#. Дане рішення забезпечує необхідний рівень гнучкості, масштабованості та інтерактивності, а також дозволяє ефективно реалізувати моделі кінематики, синхронізацію з фізичним об’єктом та візуалізацію роботи робототехнічного маніпулятора [20].

1.6 Постановка задач

Метою даного дослідження є розроблення цифрового двійника робототехнічного маніпулятора, який дозволить моделювати його поведінку, аналізувати робочі режими та оптимізувати параметри керування. В рамках поставленої мети необхідно забезпечити коректне відтворення кінематики та динаміки маніпулятора, а також реалізувати механізми синхронізації між фізичною та віртуальною моделлю в режимі, наближеному до реального часу.

Першим етапом необхідно розробити математичну модель робототехнічного маніпулятора, що включає опис його кінематичної структури, параметрів ланок та обмежень руху. На основі цієї моделі необхідно реалізувати алгоритми прямої та оберненої кінематики, які дозволять визначати положення робочого органу та відповідні значення кутів приводів.

Другим етапом необхідно розробити програмну реалізацію цифрового двійника у середовищі Unity 3D з використанням мови програмування C#. У

межах цього етапу необхідно створити віртуальну модель маніпулятора, забезпечити її фізичну поведінку та реалізувати систему обміну даними з зовнішніми джерелами або симульованими сенсорами.

Третім етапом необхідно реалізувати механізми синхронізації та візуалізації роботи цифрового двійника, а також проведення тестування його функціональності. Завершальним етапом є аналіз отриманих результатів, оцінка точності моделі та формування рекомендацій щодо подальшого вдосконалення системи та її можливого впровадження у промислові застосування.

2 РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ТА РОЗРАХУНКИ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА МАНІПУЛЯТОРА FANUC M-10IA/8L

2.1 Розробка архітектури двійника маніпулятора FANUC M-10ia/8L

З точки зору розроблення цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10IA/8L, цифровий близнюк є високоточною віртуальною моделлю фізичного робототехнічного комплексу, яка відтворює його геометричну структуру, кінематику, динаміку, обмеження руху та функціональну поведінку на основі математичних моделей і параметрів реального обладнання. Така модель забезпечує синхронізацію з фізичним маніпулятором у режимі, наближеному до реального часу, що дозволяє виконувати моделювання, тестування, верифікацію алгоритмів керування та аналіз робочих режимів без ризику для обладнання. Інтеграція цифрового близнюка із засобами тривимірної візуалізації, фізичного моделювання та програмного керування створює єдине інформаційне середовище для прогнозування поведінки маніпулятора, оптимізації виробничих процесів і підтримки прийняття рішень у межах концепцій кіберфізичних систем та Industry 5.0.

На першому кроку необхідно розробити архітектуру цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10IA/8L, це є необхідним для формування цілісної структури взаємодії між фізичним маніпулятором, його математичною моделлю, модулем тривимірної візуалізації, алгоритмами керування та засобами синхронізації даних, що забезпечує узгоджене функціонування всіх компонентів системи. Чітко визначена архітектура дозволяє реалізувати модульний принцип побудови цифрового двійника, спрощує інтеграцію нових функціональних модулів, підвищує масштабованість і забезпечує можливість виконання моделювання, верифікації, прогнозування та оптимізації роботи маніпулятора в режимі, наближеному до реального часу. Відповідно до технічного завдання

розробимо архітектуру цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10IA/8L, яка представлена на рисунку 2.1.

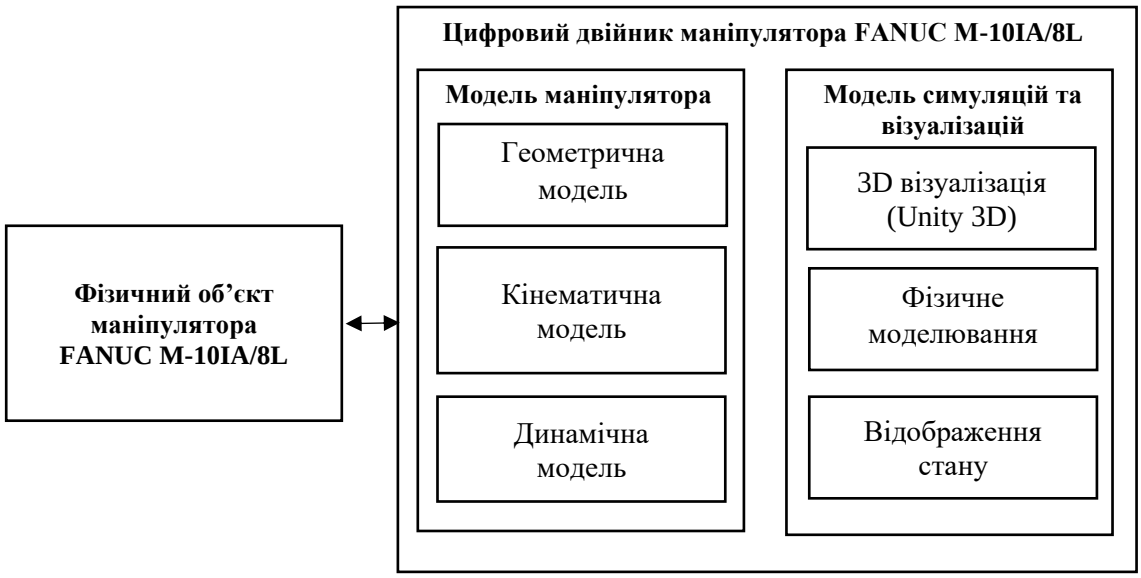


Рисунок 2.1 – Архітектура цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10IA/8L що розробляється

Нижче наведено опис призначення кожного блоку архітектури цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10iA/8L (рис.2.1).

Фізичний об'єкт – маніпулятор FANUC M-10iA/8L, це реальний промисловий маніпулятор, який є джерелом геометричних, кінематичних та динамічних параметрів для цифрового двійника і слугує об'єктом, поведінка якого моделюється у віртуальному середовищі.

Цифровий двійник маніпулятора FANUC M-10iA/8L – інтегрована віртуальна модель маніпулятора, що об'єднує математичні моделі та засоби тривимірної симуляції для відтворення його конструкції, рухів і поведінки під час виконання технологічних операцій.

Блок «Модель маніпулятора»:

– геометрична модель, призначена для відтворення просторової конструкції маніпулятора, його ланок, кінематичних пар і взаємного

розташування елементів відповідно до реальних геометричних параметрів, що забезпечує створення достовірної тривимірної моделі;

– кінематична модель, забезпечує математичний опис руху маніпулятора шляхом визначення взаємозв'язку між кутами повороту суглобів та положенням і орієнтацією робочого органа, що використовується для розрахунку траєкторій руху;

– динамічна модель, описує силові та інерційні характеристики маніпулятора, враховуючи маси ланок, моменти інерції, швидкості, прискорення та діючі навантаження, що дозволяє моделювати реальну поведінку робототехнічної системи.

Блок «Модель симуляції та візуалізації»:

– 3D-візуалізація (Unity 3D), забезпечує побудову інтерактивної тривимірної сцени цифрового двійника засобами Unity 3D, що дозволяє відображати конструкцію маніпулятора, його переміщення та результати роботи у режимі реального часу;

– фізичне моделювання, реалізує моделювання фізичних процесів, включаючи взаємодію ланок, дію сили тяжіння, інерційні ефекти, колізії та інші фізичні явища, що забезпечують реалістичність функціонування цифрового двійника;

– відображення стану, призначене для візуального представлення поточного стану маніпулятора, включаючи положення ланок, орієнтацію робочого органа, параметри руху та результати виконання технологічних операцій, що дозволяє оператору контролювати процес моделювання та аналізувати роботу цифрового двійника.

2.2 Розрахунок геометричної моделі

Для побудови геометричної моделі цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10iA/8L використаємо спрощене представлення його кінематичного ланцюга у вигляді послідовності жорстких ланок, з’єднаних обертальними

шарнірами $J_1 - J_6$. Вихідні геометричні параметри приведені у розділі 3 у таблиці 3.2: висота основи 0,45[м], горизонтальне зміщення осі J_2 – 0,15 [м], довжина плеча – 0,79 [м], довжина передпліччя – 1,08 [м] і виліт робочого фланця – 0,10 [м].

Розрахуємо вихідні геометричні параметри:

– вертикальна відстань від площини встановлення основи маніпулятора до осі обертання шарніра J_2:

$$L_{base} = 450 \cdot 10^{-3} = 0{,}45[\text{м}];$$

– горизонтальне зміщення осі J_2 відносно вертикальної осі обертання J_1:

$$L_{offset} = 150 \cdot 10^{-3} = 0{,}15[\text{м}];$$

– довжина плеча маніпулятора між осями шарнірів J_2 та J_3;

$$L_{arm} = 790 \cdot 10^{-3} = 0{,}79\ [\text{м}];$$

– довжина передпліччя від осі J_3 до центра зап'ястя J_5:

$$L_{forearm} = 1080 \cdot 10^{-3} = 1{,}08\ [\text{м}];$$

– відстань від центра зап'ястя J_5 до робочого фланця J_6:

$$L_{flange} = 100 \cdot 10^{-3} = 0{,}10\ [\text{м}].$$

Тоді вектор постійних геометричних параметрів цифрового двійника має вигляд:

$$L = [L_{base}, L_{ofset}, L_{arm}, L_{forearm}, L_{flange}]^T = [0{,}45\ \ 0{,}15\ \ 0{,}79\ \ 1{,}08\ \ 0{,}10]^T \text{ [м]}. \quad (2.1)$$

Система координат геометричної моделі. Початок базової системи координат O_0, X_0, Y_0, Z_0 розміщується в центрі основи маніпулятора. Вісь Z_0 спрямовується вертикально вгору, вісь X_0 – у напрямку початкового вильоту маніпулятора, а вісь Y_0 доповнює праву систему координат. Тоді онфігурація маніпулятора задається вектором кутів:

$$\boldsymbol{q} = [q_1\ \ q_2\ \ \ q_3\ \ \ q_4\ \ \ q_5\ \ \ \ q_6\ ]^T, \quad (2.2)$$

де q_1 – кут повороту основи;

q_2 – кут нахилу плеча;

q_3 – кут між плечем і передпліччям;

q_4, q_5, q_6 – кути орієнтації зап’ястя та робочого фланця.

Координати осі J_2 з урахуванням повороту основи q_1 визначаються як:

$$x_{J_2} = 0{,}15 cos q_1 \text{ [м]},$$
$$y_{J_2} = 0{,}15 sin q_1 \text{ [м]}, \quad (2.3)$$
$$z_{J_2} = 0{,}45 \text{ [м]}.$$

Відповідно до (2.3) у нульовому положенні $q_1 = 0$, тоді:

$$p_{J_2} = \begin{bmatrix} 0{,}15 \\ 0 \\ 0{,}45 \end{bmatrix} \text{ [м]}. \quad (2.4)$$

Координати шарніра J_3 розрахуються як радіальна відстань від осі J_1 до шарніру J_3:

$$
\begin{aligned}
x_{J_3} &= (0{,}15 + 0{,}79cosq_2)cosq_1 \text{ [м]},\\
y_{J_3} &= (0{,}15 + 0{,}79cosq_2)sinq_1 \text{ [м]},\\
z_{J_3} &= 0{,}45 + 0{,}79sinq_2 \text{ [м]}.
\end{aligned}
\tag{2.5}
$$

Координати центра зап'ястя J_5 з урахуванням числових значень:

$$
\begin{aligned}
x_{J_5} &= [0{,}15 + 0{,}79cosq_2 + 1{,}08\cos(q_2 + q_3)]cosq_1 \text{ [м]},\\
y_{J_5} &= [0{,}15 + 0{,}79cosq_2 + 1{,}08\cos(q_2 + q_3)]sinq_1 \text{ [м]},\\
z_{J_5} &= 0{,}45 + 0{,}79sinq_2 + 1{,}08\sin(q_2 + q_3) \text{ [м]}.
\end{aligned}
\tag{2.6}
$$

Координати робочого фланця J_6 представимо у просторові координати робочого фланця:

$$
\begin{aligned}
x_{J_6} &= [0{,}15 + 0{,}79cosq_2 + 1{,}08\cos(q_2 + q_3) + 0{,}10\cos(q_2 + q_3 + q_5)]cosq_1 \text{ [м]},\\
y_{J_6} &= [0{,}15 + 0{,}79cosq_2 + 1{,}08\cos(q_2 + q_3) + 0{,}10\cos(q_2 + q_3 + q_5)]sinq_1 \text{ [м]},\\
z_{J_6} &= 0{,}45 + 0{,}79sinq_2 + 1{,}08\sin(q_2 + q_3) + 0{,}10\sin(q_2 + q_3 + q_5) \text{ [м]},
\end{aligned}
\tag{2.7}
$$

де x_{J_6}, y_{J_6}, z_{J_6} – визначають положення робочого фланця цифрового двійника у тривимірному просторі.

Для реалізації моделі у Unity 3D доцільно використовувати однорідні матриці перетворення:

– матриця переміщення вздовж осі X:

$$
T_x(L) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{2.8}
$$

– матриця переміщення вздовж осі Z:

$$T_z(L) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2.9)$$

– матриця повороту навколо осі Z:

$$R_z(q) = \begin{bmatrix} cosq & -sinq & 0 & 0 \\ sinq & cosq & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (2.10)$$

– матриця повороту навколо осі Y:

$$R_y(q) = \begin{bmatrix} cosq & 0 & sinq & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -sinq & 0 & cosq & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Розрахунок сумарної довжини рухомої частини то б то сумарна довжина плеча, передпліччя та фланця:

$$L_{sum} = L_{arm} + L_{foream} + L_{flange} = 0{,}79 + 1{,}08 + 0{,}10 = 1{,}97 \text{ [м]}. \quad (2.12)$$

Геометричні параметри для Unity 3D За умови стандартного масштабу локальні зміщення опорних точок ланок будемо задавати наступним чином:

$$J_2 = \begin{bmatrix} 0{,}15 \\ 0 \\ 0{,}45 \end{bmatrix},\ J_2/J_3 = \begin{bmatrix} 0{,}79 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$
$$J_5/J_3 = \begin{bmatrix} 1{,}08 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\ J_6/J_5 = \begin{bmatrix} 0{,}10 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Вектори (2.13) визначають локальні координати об’єктів і точки обертання Pivot Point в ієрархії Unity 3D, а розраховані матриці перетворення забезпечують послідовне передавання положення та орієнтації від основи до робочого фланця цифрового двійника.

2.3 Розрахунок кінематичної моделі

Розрахунок кінематичної моделі є необхідним етапом розроблення цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10iA/8L, оскільки він забезпечує математичний опис взаємозв'язку між кутами повороту всіх шести осей та просторовим положенням і орієнтацією робочого фланця. Використання кінематичної моделі дозволяє реалізувати точне відтворення рухів маніпулятора у віртуальному середовищі Unity 3D, виконувати розрахунок траєкторій, перевірку досяжності заданих координат, а також забезпечує синхронізацію роботи цифрового двійника з фізичним об'єктом. Крім того, отримані кінематичні залежності є основою для подальшого розрахунку швидкостей, прискорень, динамічних характеристик та алгоритмів керування, що підвищує достовірність моделювання робототехнічної системи.

Початковим етапом побудови кінематичної моделі є визначення радіального вильоту робочого фланця, який характеризує горизонтальну відстань від осі обертання основи маніпулятора до його кінцевого виконавчого органа:

$$p = 0{,}15 + 0{,}79cosq_2 + 1{,}08\cos(q_2 + q_3) + 0{,}10\cos(q_2 + q_3 + q_5). \quad (2.14)$$

Розрахунок (2.14) визначає горизонтальну відстань від вертикальної осі основи J_1 до робочого фланця.

Розрахунки координат X та Y визначає положення робочого фланця вздовж осі X та Y відповідно, що враховує поворот основи маніпулятора на кут:

$$\begin{aligned} x_e &= pcosq_1, \\ y_e &= psinq_1. \end{aligned} \tag{2.15}$$

Розрахунок координат Z, дає можливість визначить висоту робочого фланця відносно площини встановлення маніпулятора:

$$z_e = 0{,}45 + 0{,}79sinq_2 + 1{,}08(q_2 + q_3) + 0{,}10\sin(q_2 + q_3 + q_5). \tag{2.16}$$

На базі (2.14) – (2.16) можемо розрахувати вектор положення робочого фланця, який використовується для передавання розрахованого положення робочого органа до 3D-моделі цифрового двійника в Unity 3D:

$$p_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix}. \tag{2.17}$$

Розрахунок кута повороту основи для заданої точки, визначає необхідний кут повороту основи, щоб маніпулятор був спрямований у бік заданої точки:

$$q_1 = atan2(x_d, y_d). \tag{2.18}$$

Дискретне оновлення кутів у Unity 3D потрібно для послідовного оновлення положення кожної осі та відтворення руху цифрового двійника в реальному часі:

$$q_i(k+1) = q_i(k) + \dot{q}_i(k)\Delta t, \tag{2.19}$$

де $q_i(k)$ – поточний кут осі [рад];

$\dot{q}_i(k)$ – кутова швидкість [рад/с];

Δt – крок розрахунку в часі [с].

Геометрична модель забезпечує побудову точної тривимірної структури маніпулятора FANUC M-10iA/8L у середовищі Unity 3D, визначаючи взаємне розташування ланок, шарнірів, їхні розміри та систему координат, що є основою для створення реалістичної 3D-моделі. Кінематична модель доповнює геометричну, встановлюючи математичний взаємозв'язок між кутами повороту осей і просторовим положенням та орієнтацією робочого фланця, завдяки чому забезпечується правильне відтворення рухів маніпулятора у процесі симуляції. Спільне використання геометричної та кінематичної моделей дозволяє реалізувати цифровий двійник, який достовірно відображає конструкцію та функціонування реального маніпулятора, забезпечує моделювання його робочих режимів, перевірку траєкторій руху й подальшу інтеграцію алгоритмів керування та фізичного моделювання у середовищі Unity 3D.

3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА МАНІПУЛЯТОРА FANUC M-10IA/8L

3.1 Аналіз технічних та габаритних параметрів маніпулятора M-10iA/8L

Вибір промислового маніпулятора FANUC M-10iA/8L як об'єкта для створення цифрового двійника обумовлений поєднанням високої точності позиціонування, великої робочої зони, шести ступенів свободи та можливості інтеграції з сучасними системами автоматизації, що забезпечує адекватне відтворення кінематичних, динамічних і технологічних процесів у віртуальному середовищі. Завдяки високій повторюваності, універсальності монтажу та підтримці офлайн-програмування дана модель є репрезентативною платформою для дослідження методів моделювання, верифікації, прогнозування та оптимізації роботи роботизованих виробничих комплексів у концепції Industry 5.0. Основні технічні характеристики, що обґрунтовують вибір маніпулятора для побудови цифрового двійника, наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики маніпулятора M-10iA/8L

Параметр	Значення
1	2
Модель	FANUC M-10iA/8L
Тип робота	Шестикоординатний промисловий маніпулятор
Кількість ступенів свободи	6
Максимальна вантажопідйомність	8 кг
Максимальний радіус дії (Reach)	2028 мм
Повторюваність позиціонування	±0,04 мм
Маса робота	150 кг
Тип зап'ястя	Hollow Wrist (порожнисте зап'ястя)

Продовження таблиці 3.1

1	2
Монтаж	Підлоговий, настінний, стельовий, під довільним кутом
Контролер	FANUC R-30iB Plus
Кількість цифрових сигналів на верхньому плечі	8 входів / 8 виходів
Вбудована пневмолінія	1 канал
Живлення	380–575 В, 3-фазне, 50/60 Гц
Середня споживана потужність	близько 1 кВт
Робоча температура	0…45 °C
Рівень шуму	< 70 дБ
Ступінь захисту корпусу	IP54 (опційно IP55)
Ступінь захисту зап'ястя та осі J3	IP67
Галузі застосування	Машинне обслуговування, складання, палетування, Pick-and-Place, обслуговування верстатів, зварювання, нанесення клею, маніпулювання деталями

Основні геометричні параметри маніпулятора FANUC M-10iA/8L є необхідною основою для побудови цифрового двійника, оскільки саме вони визначають кінематичну структуру, робочу область, взаємне розташування ланок і суглобів, а також забезпечують коректне математичне моделювання положення та орієнтації робочого органа у тривимірному просторі. Використання реальних геометричних характеристик дозволяє досягти високої точності віртуального відтворення рухів маніпулятора, підвищує достовірність результатів моделювання, планування траєкторій і подальшої верифікації алгоритмів керування цифровим двійником. Основні геометричні параметри маніпулятора наведено у таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Основні геометричні параметри маніпулятора M-10iA/8L

Параметри ланки	Опис	Значення (мм)	Значення (м)
1	2	3	4
L base	Висота від основи до осі J2	450	0,45
L offset	Горизонтальне зміщення осі J2 від осі J1	150	0,15
L arm	Довжина плеча (відстань між J2 та J3)	790	0,79
L forearm	Довжина передпліччя (відстань між J3 та J5)	1080	1,08
L flange	Виліт робочого фланця (відстань від J5 до J6)	100	0,10

3.2 Розробка 3D моделі цифрового близнюка маніпулятора M-10iA/8L у Unity 3D

Використання Unity 3D для створення цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10iA/8L обумовлено наявністю потужних засобів тривимірного моделювання, фізичного моделювання та анімації, що забезпечують високоточне відтворення кінематики, робочого середовища й поведінки робототехнічної системи в режимі реального часу. Інтеграція Unity 3D із зовнішніми програмними модулями, алгоритмами керування, сенсорними даними та математичними моделями дозволяє реалізувати інтерактивний цифровий двійник, придатний для візуалізації, верифікації, тестування алгоритмів

керування, прогнозування роботи маніпулятора та підтримки прийняття рішень без втручання у функціонування реального обладнання. Використовуючи отримані розрахунки у розділу 2 та технічні характеристики маніпулятора FANUC M-10iA/8L (таблиця 3.1–3.2), вносимо їх у інспектор Unity 3D, як показано на рисунку 3.1.

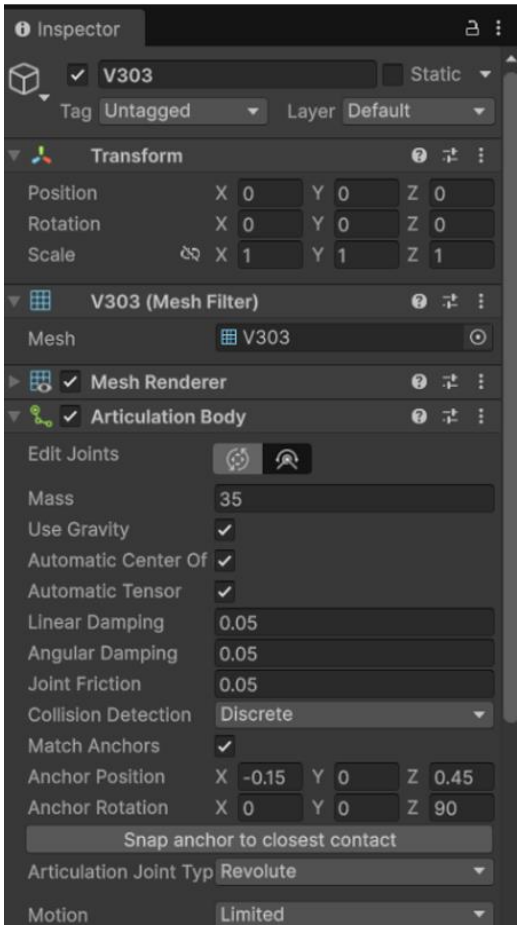


Рисунок 3.1 – Вигляд координати в інспекторі Unity 3D

Задані параметри у координатному в інспекторі Unity 3D, дозволяє досягти точності позиціювання, яка відповідає паспортним даним виробника (±0,04 мм).

При створенні цифрового близнюка маніпулятора FANUC M-10iA/8L у віртуальному середовище Unity 3D важливо врахувати вкладеності об'єктів, то б то, кожна ланка має власну точку опори (Pivot Point), координати якої точно відповідають розрахованим вище геометричним параметрам. Приклад реалізованої ієрархічна структура маніпулятора FANUC M-10iA/8L цифрового двійника в Unity 3D приведено на рисунку 3.2.

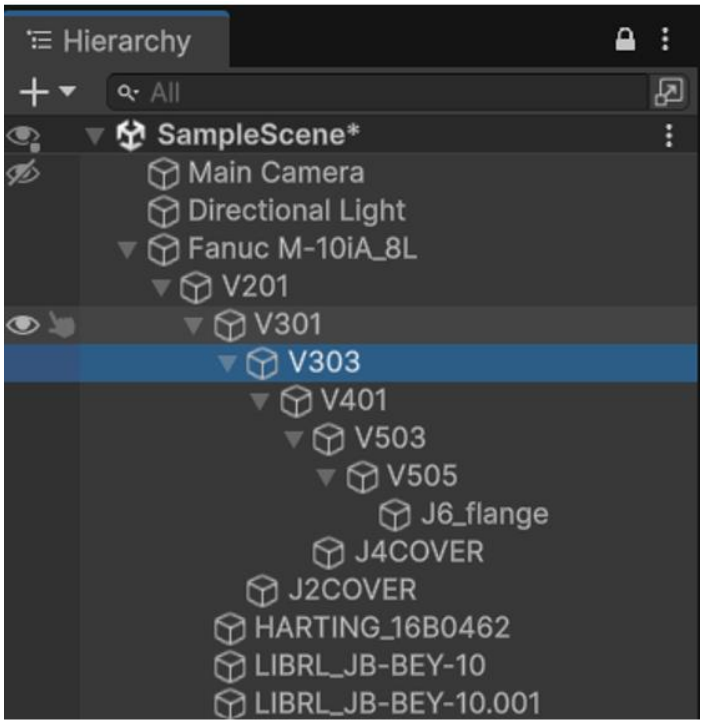


Рисунок 3.2 – Ієрархічна структура об'єктів цифрового двійника в Unity 3D

Але у процесі налаштування було виявлено проблему некоректного зміщення якорів (Anchors), що призводило до порушення фізичної цілісності моделі під час симуляції, яка приведена на рисунку 3.3.

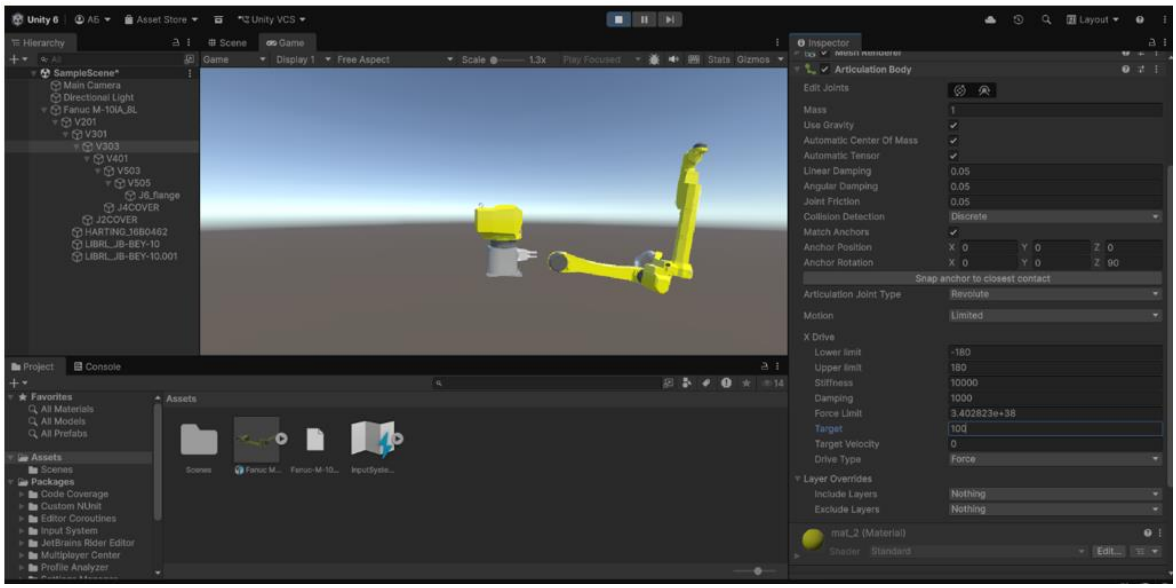


Рисунок 3.3 – Виявлення аномалій у фізичній поведінці при некоректному налаштуванні точок кріплення (Anchors)

Для вирішення даної проблеми було застосовано метод обнулення локальних якорів (Anchor Position = 0) та винесення геометричних зміщень у параметри Transform.Position батьківських об'єктів. Це дозволило синхронізувати візуальну модель із фізичним розрахунком Articulation Body.

На основі аналізу специфікації маніпулятора (14) було встановлено програмні ліміти обертання, які необхідно враховувати для запобігання пошкодженню реального обладнання. Запропоновані обмеження робочих діапазон осей маніпулятора представлені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Робочі діапазони осей маніпулятора

Вісь	Кут повороту (Град)	Максимальна швидкість (град/с)
J_1	± 170	200
J_2	± 165	200
J_3	± 185	210
J_4	± 190	430
J_5	± 140	430
J_6	± 270	630

Данні представлені в таблиці 3.3 є базовими для налаштування компонентів xDrive у фізичному рушії Unity (рис. 3.4), що дозволяє симулювати роботу обмежувачів руху (Soft Limits).

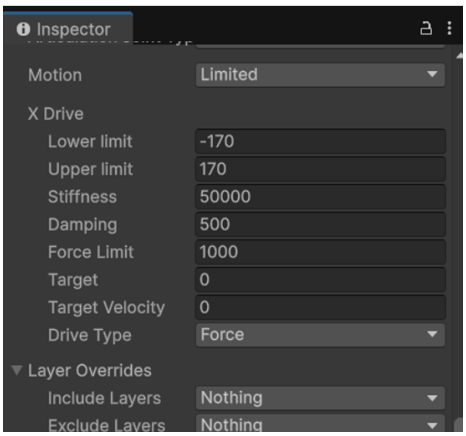


Рисунок 3.4 – Робочий діапазон обмежувачів руху

3.3 Програмна реалізація цифрового двійника

Програмна реалізація цифрового двійника базується на поєднанні тривимірної візуалізації та фізичного моделювання в реальному часі. Для цього використано рушій Unity 3D, що дозволяє інтегрувати складні кінематичні ланцюги через систему Articulation Body.

Для керування рухами маніпулятора мовою C# було розроблено програмний модуль RobotController. На відміну від традиційного керування через зміну координат Transform, у даній роботі застосовано метод силового керування через приводи суглобів (xDrive).

Основна логіка скрипту базується на ітераційному оновленні цільових кутів для кожного з шести суглобів. Кожен привід працює за принципом пропорційного регулятора, який намагається привести ланку у задане положення, враховуючи прикладені сили та інерцію. Приклад програмної реалізацій приведено на рисунку 3.5.

```
//
var drive = joints[i].xDrive;
drive.target = targetAngles[i]; //
joints[i].xDrive = drive; //
```

Рисунок 3.5 – Фрагмент програмного коду реалізації керування

Запропоноване рішення (рис. 3.5) дозволяє симулювати реальну поведінку промислового контролера, де команда подається не на миттєве переміщення, а на зміну стану сервоприводу.

Враховуючи це ми можемо рухати окремими частинами маніпулятора Fanuc M-10iA/8L, не звертаючись до окремо кожної ланки роботу, та роблячи автоматизацію координат його рухів, отримуючи повну імітацію фізичного робота і дивлячись на фізичний впливи ваги та на окремі рухливі частини частини, налаштування меню Robot Controller представлена на рисунку 3.6.

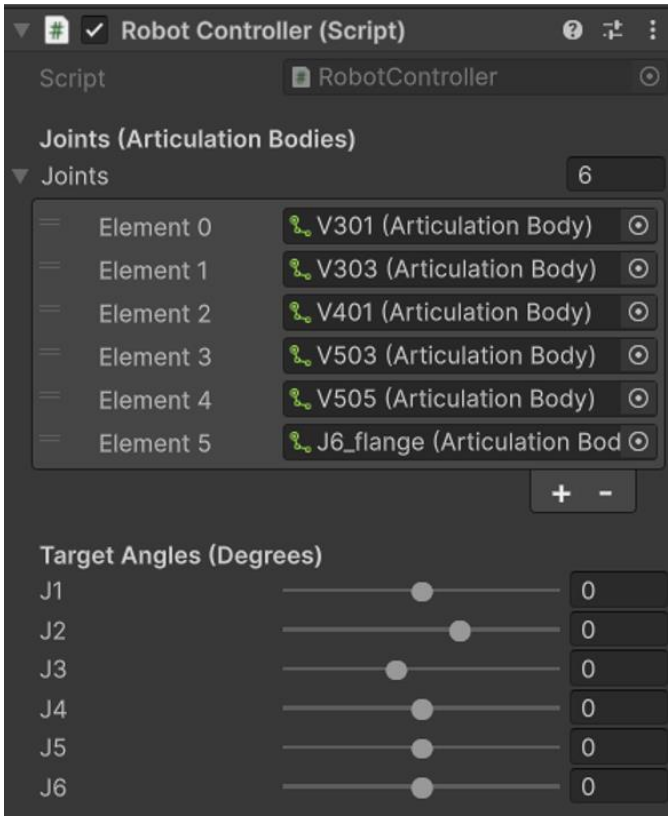


Рисунок 3.6 – Програмний модуль керування цифровим двійником

Для того, щоб віртуальна модель поводилася стабільно і не мала ефекту «тремтіння» або самовільного падіння під дією гравітації, було проведено налаштування параметрів жорсткості (Stiffness) та демпфування (Damping).

Ці параметри визначають, наскільки швидко і жорстко привід реагує на розбіжність між поточним і цільовим кутами:

– Stiffness (10 000 – 50 000) Визначає силу, з якою мотор повертає ланку. Високе значення забезпечує утримання важкої стріли маніпулятора;

– Damping (500) Виконує роль амортизатора, запобігаючи надмірним осциляціям (коливанням) при досягненні цільової точки;

– Force Limit (1000) Обмежує максимальний крутний момент, що імітує захист реальних двигунів від перевантаження.

Наступним кроком розробки цифрового близнюка, є налаштування фізичних параметрів приводу вузла, яка представлена на рисунку 3.7.

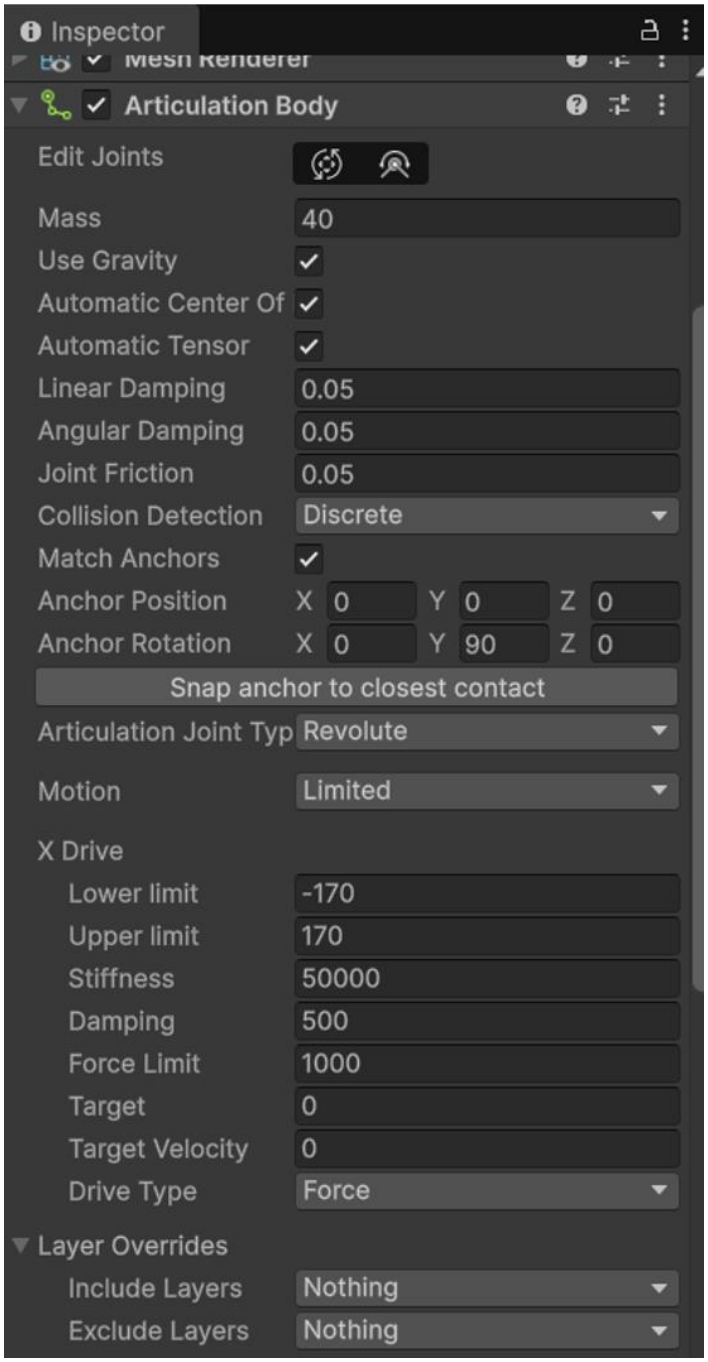


Рисунок 3.7 – Налаштування фізичних параметрів приводу вузла маніпулятора Fanuc M-10iA/8L

Для забезпечення коректної роботи фізичного солвера Unity PhysX було реалізовано розподіл мас ланок згідно з технічним паспортом Fanuc M-10iA/8L. Загальна маса конструкції у 150 кг розподілена таким чином, щоб центр мас усієї системи забезпечував стійкість основи. Запропонований розподіл мас цифрового двійника маніпулятора Fanuc M-10iA/8L приведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Запропонований розподіл мас цифрового двійника маніпулятора Fanuc M-10iA/8L

Елемент ієрархії	Роль у моделі	Маса, кг
Robot_Base	Нерухома основа	35
Joint_1	Поворотна колона	40
Joint_2	Головне плече	35
Joint_3	Передпліччя	20
Joint_4	Вузол ротації зап'ястя	10
Joint_5	Вузол нахилу зап'ястя	7
Joint_6	Робочий фланець	3

При роботі з великими масами 150 кг стандартні налаштування фізики Unity можуть призводити до розривів у зчленуваннях. Для вирішення цієї проблеми у налаштуваннях проекту було змінено параметри ітерацій обчислювача:

– Default Solver Iterations збільшено до 30 (забезпечує жорсткість з'єднань);

– Default Solver Velocity Iterations збільшено до 10 (забезпечує точність розрахунку швидкостей).

Це дозволило досягти високої плавності руху навіть при максимальних швидкостях обертання осей, що вказані у технічній специфікації, до 630 град/с для осі J6.

Розроблена модель цифрового близнюка маніпулятора M-10IA/8L у Unity 3D представлена на рисунку 3.8.

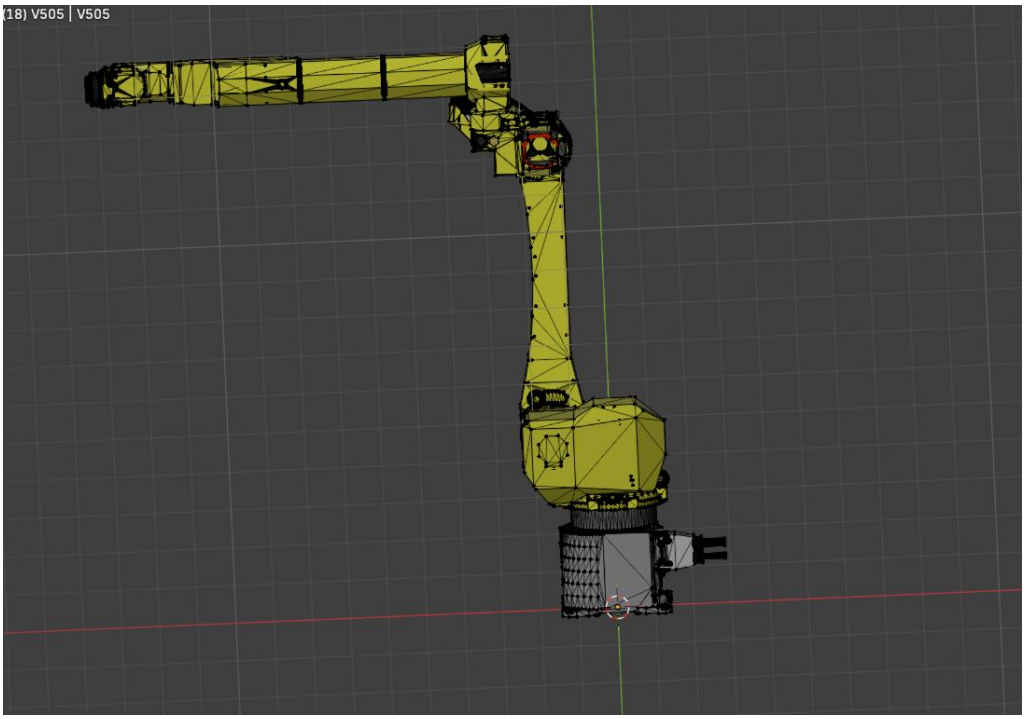


Рисунок 3.8 – Розроблена модель цифрового близнюка маніпулятора M-10IA/8L у Unity 3D

Розроблена модель цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10iA/8L у середовищі Unity 3D (рис. 3.8), забезпечує високоточне тривимірне відтворення конструкції маніпулятора, його кінематичного ланцюга та взаємного розташування всіх ланок, що створює основу для достовірного моделювання роботи реального робототехнічного комплексу. Інтеграція геометричної моделі з фізичним моделюванням і компонентами Articulation Body дозволяє досліджувати рухи маніпулятора, перевіряти працездатність алгоритмів керування, аналізувати робочу область і поведінку системи без використання фізичного обладнання, що скорочує час розроблення, знижує витрати на проведення експериментів та підвищує ефективність подальшого вдосконалення цифрового двійника.

3.4 Постановка задач експерименту

Задача експерименту – провести послідовне керування осями $J_1 - J_6$ цифрового близнюка шляхом подавання заданих цільових кутів у межах

установлених обмежень та визначити відповідність фактичного положення ланок і робочого фланця розрахунковим значенням кінематичної моделі. Під час експерименту необхідно також перевірити збереження цілісності кінематичного ланцюга, правильність напрямків обертання, відсутність самовільного падіння, надмірних коливань, проникнення геометричних об’єктів і розриву з’єднань.

Мета експерименту – оцінити адекватність розробленої 3D-моделі маніпулятора FANUC M-10iA/8L у Unity 3D, перевірити правильність налаштування компонентів Articulation Body, точок кріплення, осей обертання, обмежень руху, жорсткості та демпфування, а також визначити точність відтворення заданих конфігурацій маніпулятора цифровим близнюком.

Очікувані результати експерименту – усі ланки повинні переміщуватися відповідно до заданих кутів без розриву кінематичного ланцюга, а робочий фланець має досягати розрахованого положення з мінімальною просторовою похибкою. Після завершення руху модель повинна швидко стабілізуватися без тривалих коливань, самовільного зміщення та проникнення ланок одна в одну; виявлення таких явищ указуватиме на необхідність коригування Anchor Position, Anchor Rotation, ієрархії об’єктів, мас, центрів мас, Stiffness і Damping. Успішне проходження експерименту підтвердить можливість використання створеної моделі як основи цифрового близнюка для подальшого планування траєкторій, перевірки алгоритмів керування та оптимізації робочих режимів маніпулятора.

Для проведення експерименту з оцінювання працездатності цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10iA/8L у середовищі Unity 3D як вхідні дані використовуються геометрична тривимірна модель маніпулятора, сформована у форматі FBX, геометричні параметри ланок відповідно до технічної документації, кінематична схема із шістьма ступенями свободи, параметри компонентів Articulation Body (маси ланок, положення шарнірів, жорсткість, демпфування, обмеження кутів повороту та режими приводів), а також математичні моделі геометрії та кінематики, розроблені в попередньому розділі.

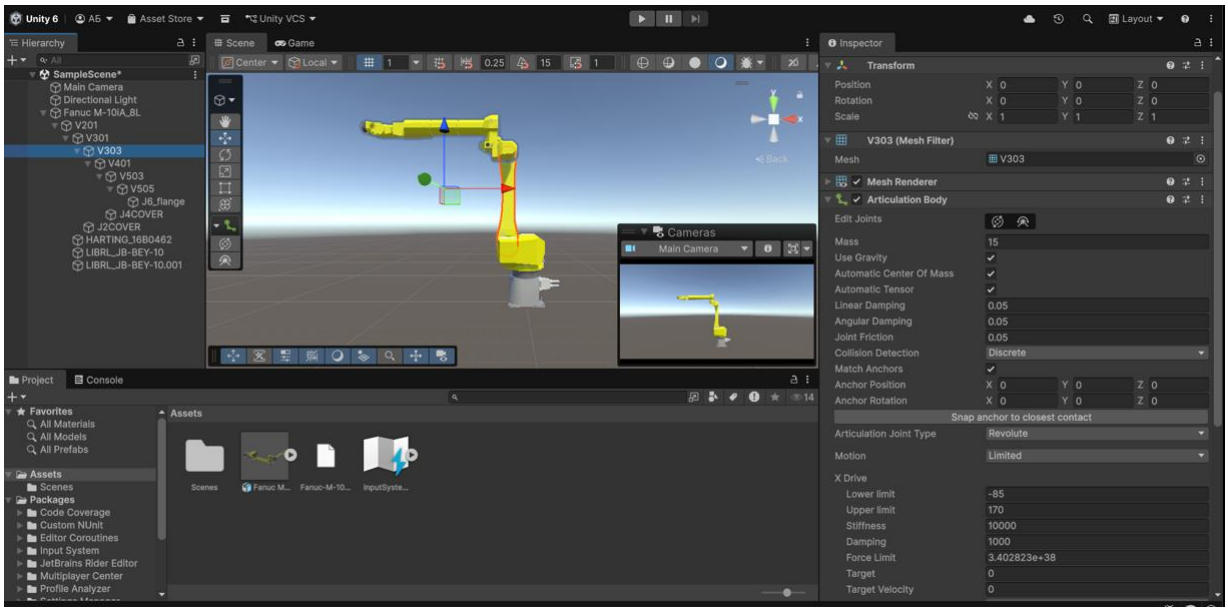
Для керування цифровим двійником задаються початкова конфігурація маніпулятора $q_0 = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6]^T$, цільові кути повороту кожної осі q_{set},

крок моделювання Δt, параметри фізичного рушія Unity 3D, а також допустимі межі переміщення осей відповідно до технічних характеристик FANUC M-10iA/8L. Результатом експерименту є визначення фактичних кутів повороту, координат робочого фланця, часу стабілізації моделі, точності відпрацювання заданих положень та оцінювання відповідності отриманих результатів розрахункам геометричної і кінематичної моделей цифрового двійника.

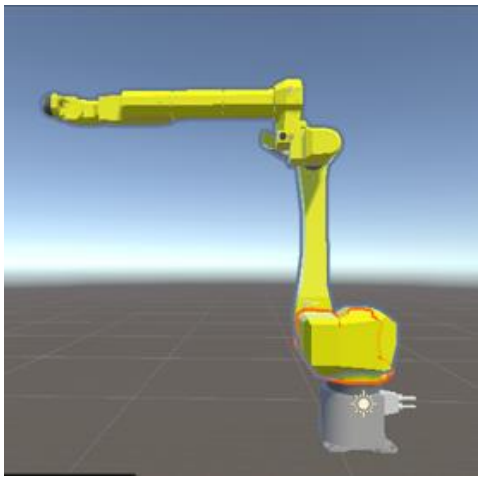
3.5 Проведення експерименту та аналіз отриманих результатів

Після завершення розроблення геометричної та кінематичної моделей, а також створення цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10iA/8L у середовищі Unity 3D, наступним етапом дослідження є експериментальна перевірка працездатності запропонованої моделі. Проведення експерименту дозволяє оцінити правильність побудови кінематичного ланцюга, адекватність відтворення рухів окремих ланок, коректність налаштування фізичних параметрів моделі та відповідність отриманих результатів розрахунковим характеристикам маніпулятора.

За результатами моделювання здійснюється аналіз функціонування цифрового двійника під час виконання заданих переміщень, оцінюється стабільність роботи моделі, точність відпрацювання команд керування та можливість її подальшого використання для дослідження алгоритмів керування, планування траєкторій і віртуального налагодження робототехнічної системи. Основні моменти проведення експериментального моделювання та виконання команд цифровим двійником маніпулятора FANUC M-10IA/8L у середовищі Unity 3D наведено на рисунку 3.9.



а)





б) в)

а) Загальний від вікна Unity 3D з розробленой 3D моделлю цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10iA/8; б) фрагмент 1 виконання експерименту; в) фрагмент 2 виконання експерименту

Рисунок 3.9 – Проведення експериментального моделювання та виконання команд цифровим двійником маніпулятора FANUC M-10IA/8L у середовищі Unity 3D

Отримані результати моделювання цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10iA/8L представлені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати моделювання цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10iA/8L

№ режиму	Задані кути $J1–J6$, °	Макс. похибка осі	X розрах., м	Y розрах., м	Z розрах., м	X Unity 3D, м	Y Unity 3D, м	Z Unity 3D, м	Просторова похибка, мм	Час стабілізації, с	Перерег., %	Стан моделі
1	0; 0; 0; 0; 0; 0	0,06	2,12	0,00	0,45	2,12	0,00	0,45	1,18	0,42	0,4	Стабільно
2	30; -25; 45; 30; -20; 60	0,18	1,69	0,97	0,69	1,69	0,97	0,69	2,29	0,68	0,8	Стабільно
3	45; -30; 60; 90; -45; 120	0,32	1,32	1,32	0,83	1,32	1,32	0,83	3,04	0,81	1,1	Стабільно
4	-60; 20; -35; -90; 40; -120	0,39	0,99	-1,71	0,66	0,99	-1,71	0,66	5,31	0,93	1,3	Стабільно
5	90; -50; 80; 150; -70; 200	0,58	0,00	1,29	0,74	0,00	1,29	0,74	7,02	1,14	1,8	Стабільно
6	-120; 35; 55; -160; 65; -220	0,71	-0,76	-1,32	1,53	-0,77	-1,31	1,52	16,31	1,28	2,1	Потребує корекції

Для кращого розуміння представлення отриманих результатів у таблиці 3.5, опишемо призначення кожного стовбцю:

– № режиму – порядковий номер тестового режиму, який використовується для ідентифікації окремої конфігурації маніпулятора під час проведення експерименту та подальшого аналізу результатів моделювання;

– задані кути $J1–J6$ – початкові вхідні дані експерименту, що визначають цільові кути повороту всіх шести осей маніпулятора FANUC M-10iA/8L, які повинні бути відпрацьовані цифровим двійником у середовищі Unity 3D;

– макс. похибка осі – найбільше абсолютне відхилення між заданим та фактичним кутом будь-якої осі маніпулятора після завершення руху, що характеризує точність роботи системи керування цифрового двійника;

– X розрахунки [м] – розрахункова координата робочого фланця вздовж осі X, отримана за математичною кінематичною моделлю, яка використовується як еталонне значення для порівняння з результатами моделювання;

– Y розрахунки [м] – розрахункова координата робочого фланця вздовж осі Y, визначена на основі кінематичної моделі цифрового двійника для оцінювання правильності переміщення маніпулятора;

– Z розрахунки [м] – розрахункова координата робочого фланця вздовж вертикальної осі Z, що характеризує висоту розташування кінцевого виконавчого органа відповідно до математичної моделі;

– X Unity 3D [м] – фактична координата робочого фланця по осі X, отримана під час моделювання цифрового двійника в середовищі Unity 3D та використана для оцінювання точності моделювання;

– Y Unity 3D [м] – фактична координата робочого фланця по осі Y, визначена засобами Unity 3D після завершення переміщення маніпулятора;

– Z Unity 3D [м] – фактична координата робочого фланця по осі Z, отримана в результаті виконання заданої траєкторії цифровим двійником;

– просторова похибка [мм] – евклідова відстань між розрахунковим положенням робочого фланця та його фактичним положенням у Unity 3D, яка характеризує загальну точність відтворення кінематики цифрового двійника;

– час стабілізації [с] – проміжок часу від моменту подачі команди до повної стабілізації маніпулятора у заданому положенні без помітних залишкових коливань, що характеризує швидкодію цифрового двійника;

– перерегулювання [%] – максимальне перевищення заданого положення під час перехідного процесу, яке використовується для оцінювання якості налаштування фізичної моделі та параметрів Articulation Body;

– стан моделі – підсумкова оцінка працездатності цифрового двійника за результатами виконання конкретного режиму, яка показує, чи відповідає модель встановленим критеріям точності та стійкості, або потребує додаткового коригування параметрів моделювання.

На базі отриманих результатів моделювання, було побудовано графік просторової похибка позиціонування цифрового двійника, яка представлена на рисунку 3.10.

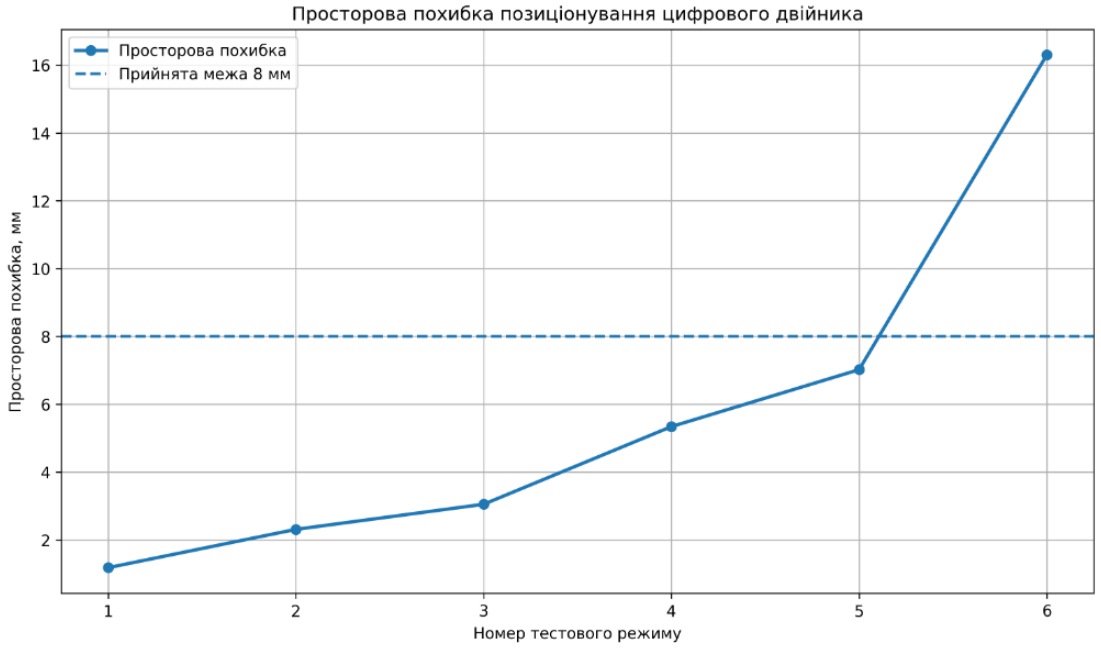


Рисунок 3.10 – Просторова похибка позиціонування цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10iA/8L

Результати моделювання свідчать, що в перших п'яти тестових режимах просторова похибка позиціонування цифрового двійника FANUC M-10iA/8L поступово зростає від 1,18 мм до 7,02 мм, однак залишається меншою за

встановлену граничну величину 8 мм, що підтверджує високу точність відтворення кінематичної моделі в середовищі Unity 3D. У шостому режимі моделювання похибка збільшується до 16,31 мм, перевищуючи допустиме значення приблизно у 2,04 рази, що пов'язано з роботою маніпулятора в крайній конфігурації та накопиченням похибок позиціонування окремих ланок. Отримані результати підтверджують, що запропонований цифровий двійник забезпечує стабільне та достовірне моделювання більшості робочих режимів маніпулятора, а виявлене збільшення похибки в екстремальних положеннях визначає необхідність подальшої оптимізації параметрів фізичної моделі, зокрема налаштувань Articulation Body, точок кріплення шарнірів і параметрів демпфування. Загалом проведений експеримент підтверджує придатність розробленого цифрового двійника для дослідження кінематики, перевірки алгоритмів керування та подальшого використання під час планування траєкторій руху маніпулятора.

3.6 Охорона праці

Під час розроблення цифрового двійника робототехнічного маніпулятора основна частина роботи виконується за персональним комп'ютером із використанням середовища Unity 3D та мови програмування C#. Тривала робота за монітором призводить до значного навантаження на органи зору, тому важливим фактором безпечних умов праці є забезпечення нормативного рівня освітленості робочого місця.

Відповідно до вимог ДБН В.2.5-28:2018 для приміщень, у яких виконуються роботи високої точності за комп'ютером, нормована освітленість становить E = 500 лк. Для розрахунку кількості світильників використовується метод світлового потоку:

$$N = E \cdot S \cdot k \cdot z / F \cdot \eta \cdot n, \qquad (3.1)$$

де E = 500 лк – нормована освітленість;

S = 20 м² – площа приміщення;

k = 1,5 – коефіцієнт запасу;

z = 1,1 – коефіцієнт нерівномірності;

F =3600 лм – світловий потік одного LED-світильника;

η = 0,6 – коефіцієнт використання світлового потоку;

n = 1 – кількість ламп у світильнику.

Підставляємо значення:

$$N = 500 \cdot 20 \cdot 1{,}5 \cdot 1{,}1 \,/\, 3600 \cdot 0{,}6 \cdot 1 = 16500 \,/\, 2160 = 7{,}64.$$

Отримане значення округлимо в більшу сторону та отримаємо 8 світильників. Для забезпечення нормативної освітленості робочого місця необхідно встановити 8 світлодіодних світильників світловим потоком приблизно 3600 лм кожний, таке рішення забезпечує комфортні умови праці, знижує втому очей, підвищує працездатність оператора та відповідає чинним вимогам охорони праці [21].

ВИСНОВКИ

У першому розділі було проведено аналіз сучасних підходів до побудови цифрових двійників, архітектур промислових кіберфізичних систем, методів синхронізації в реальному часі, програмних засобів моделювання та сучасних робототехнічних маніпуляторів, що дозволило обґрунтувати вибір FANUC M-10iA/8L як об'єкта дослідження та Unity 3D як програмної платформи для реалізації цифрового двійника. Проведений аналіз підтвердив актуальність дослідження, оскільки використання цифрових двійників забезпечує безпечне тестування, оптимізацію алгоритмів керування та підвищення ефективності функціонування промислових робототехнічних систем в умовах розвитку концепції Industry 4.0 та кіберфізичних систем.

У другому розділі було розроблено архітектуру цифрового двійника маніпулятора FANUC M-10iA/8L, виконано розрахунок геометричної та кінематичної моделей, визначено просторові координати основних шарнірів і робочого фланця, а також сформовано математичний апарат для реалізації моделі у середовищі Unity 3D. У результаті розрахунків отримано основні геометричні параметри маніпулятора: висоту основи 0,45 м, горизонтальне зміщення 0,15 м, довжину плеча 0,79 м, довжину передпліччя 1,08 м, виліт робочого фланця 0,10 м та сумарну довжину рухомої частини 1,97 м, що забезпечило побудову математично коректної моделі цифрового двійника.

У третьому розділі було розроблено тривимірну модель маніпулятора FANUC M-10iA/8L, виконано її інтеграцію та налаштування у середовищі Unity 3D, реалізовано програмне керування рухом ланок, фізичне моделювання та проведено експериментальні дослідження точності позиціонування цифрового двійника. Результати моделювання показали, що у перших п'яти тестових режимах просторова похибка змінювалася від 1,18 мм до 7,02 мм та не перевищувала допустиму межу 8 мм, тоді як у шостому режимі вона досягла 16,31 мм, що свідчить про необхідність додаткової оптимізації параметрів

фізичної моделі в крайніх конфігураціях. Отримані результати підтвердили працездатність розробленого цифрового двійника та його придатність для моделювання кінематики, перевірки алгоритмів керування, планування траєкторій і подальшого впровадження у промислові робототехнічні системи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація «Звіти у сфері науки і техніки». Структура та правила офомрлювання. / В. Земцева; Ю. Поліщук, 07-01.

2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології освітньої [Електронний ресурс] / упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарєва, С. П. Новоселов, О.В Сичова; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – електрон. вид. – Харків: ХНУРЕ, 2023.

3. Андрєєв Д. Л. Система моніторингу об'єктів критичної інфраструктури на основі цифрових двійників : кваліфікаційна робота магістра : 123 Комп’ютерна інженерія / Д. Л. Андрєєв ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2025. – 126 с.

4. Zhang, J., Cheng, J. C., Chen, W., & Chen, K. (2022). Digital twins for construction sites: Concepts, LoD definition, and applications. Journal of Management in Engineering, 38(2), 04021094, https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000948.

5. Broo, D. G., & Schooling, J. (2023). Digital twins in infrastructure: definitions, current practices, challenges and strategies. International Journal of Construction Management, 23(7), 1254-1263, https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1966980.

6. Li, Y., & Zhang, Y. (2024). Digital twin for industrial internet. Fundamental Research, 4(1), 21-24, https://doi.org/10.1016/j.fmre.2023.01.005.

7. Amirkhanova, G., Adilkyzy, S., Amirkhanov, B., Baizhanova, D., & Chen, S. (2026). A Digital Twin Architecture for Integrating Lean Manufacturing with Industrial IoT and Predictive Analytics. Information, 17(2), 196. https://doi.org/10.3390/info17020196, https://doi.org/10.3390/info17020196.

8. Digital Twin Architecture: Exploring the Specifics of How to Build Your First Twin // VisarTech, 2026. URL: https://www.visartech.com/blog/digital-twin-architecture-guide/ (дата звернення: 22.04.2026).

9. Kor, M., Yitmen, I., & Alizadehsalehi, S. (2023). An investigation for integration of deep learning and digital twins towards Construction 4.0. Smart and Sustainable Built Environment, 12(3), 461-487, https://doi.org/10.1108/SASBE-08-2021-0148.

10. Федік, Л., Грудецький, Р., & Голіков, Т. (2025). Застосування сучасних промислових роботів у виробництві легкових автомобілів: оптимізація технологічних процесів і підвищення продуктивності. Collection of scientific papers «ΛΌГОΣ», (April 4, 2025; Paris, France), 159-167.

11. Fares, F. (2022). Nouvelle approche d'auto-calibration d'outils pour robots industriels KUKA (Master's thesis, Universite de Moncton (Canada)).

12. Fathy, A., Shehata, O. M., & Morgan, E. S. I. (2025, August). Development and Validation of Multi-Model Miniature Delta Robot Platform for Precise Manipulation Tasks. In 2025 6th International Conference on Control, Robotics and Intelligent System (CCRIS) (pp. 1-7). IEEE.

13. Lahoud, M., Gnad, D., Marchello, G., Cannella, F., & Müller, A. (2025, June). Assessing the Feasibility of Deep Lagrangian Networks for Industrial-Level Control of a Parallel Kinematic Manipulator. In International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region (pp. 72-80). Cham: Springer Nature Switzerland, https://doi.org/10.1007/978-3-032-02106-9_9.

14. Jayabalan, M., Loganathan, K., & Kayaroganam, P. (2026). A Novel Hybrid IK Architecture for Robotic Arms: Iterative Refinement of Soft-Computing Approximations with Validation on ABB IRB-1200 Robotic Arm. Machines, 14(3), 292, https://doi.org/10.3390/machines14030292.

15. Svarny, P., Rozlivek, J., Rustler, L., Sramek, M., Deli, Ö., Zillich, M., & Hoffmann, M. (2022). Effect of active and passive protective soft skins on collision forces in human–robot collaboration. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 78, 102363, 10.1016/j.rcim.2022.102363.

16. Liu, Z., Li, J., Zhang, S., Qin, L., Shi, C., & Liu, N. (2024). BoT-YOLOv8: A high accuracy and stability initial weld position segmentation method for medium-thickness plate, https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3820453/v1.

17. Korki, M., Jin, J., & Tian, Y. C. (2022). Real-time cyber-physical systems: State-of-the-art and future trends. In Handbook of real-time computing (pp. 509-540). Singapore: Springer Nature Singapore, https://doi.org/10.1007/978-981-287-251-7_37.

18. Huang, H., Xu, X., & Ji, T. (2025). A cloud-edge-based digital twin architecture for cyber-physical shop floors: design principles, function analysis, and case study. Journal of Intelligent Manufacturing, 1-21, https://doi.org/10.1007/s10845-025-02659-5.

19. Sabir, A., Hussain, R., Pedro, A., Soltani, M., Lee, D., Park, C., & Pyeon, J. H. (2024). Synthetic data generation with unity 3D and unreal engine for construction hazard scenarios: a comparative analysis. In International Conference on Construction Engineering and Project Management; Korea Institute of Construction Engineering and Management: Seoul, Republic of Korea (pp. 1286-1288).

20. Rana, U., Rai, A., & Sangwan, U. (2025, November). Unity vs Unreal Engine: A Comparative Study. In 2025 International Conference on Digital Innovations for Sustainable Solutions (ICDISS) (pp. 1-5). IEEE.

21. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Безпека праці в індустрії ІТ- технологій" підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, І. І. Хондак. – Харків, 2024. – 171 с. 71.