

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та
робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
Розроблення програмного модуля ідентифікації оператора в
робочій зоні колаборативного робота маніпулятора
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи КІТПВМ-24-1
Леон МОЛОЖАНОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Віктор КОСЕНКО
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАР Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Моложанов Леон Миколайович, 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(да) штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

" 14 " грудня 2025 р.

A handwritten signature in brown ink, appearing to read 'L. Molozhanov', written in a cursive style.

Леон МОЛОЖАНОВ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та
робототехніки
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і
виробництва
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«26» грудня 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Моложанову Леону Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розроблення програмного модуля ідентифікації оператора в
робочій зоні колаборативного робота маніпулятора

затверджена наказом університету від 10.11.2025 р. № 1029Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 26.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Середовище розробки PyCharm; 3.2 Мова
програмування Python

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз
колаборативних роботів маніпуляторів та їх характеристик; 4.3 Аналіз методів
взаємодії та керування колаборативними роботами маніпуляторами; 4.4 Аналіз
методів ідентифікації людини; 4.5 Розроблення архітектури програмного
модуля; 4.6 Розроблення моделі ідентифікації оператора; 4.7 Розроблення
метода ідентифікації оператора; 4.8 Розроблення алгоритму роботи
програмного модуля; 4.9 Вибір мови та середовища розробки; 4.10 Розроблення
функцій ідентифікації оператора; 4.11 Постановка задач експерименту та аналіз
отриманих результатів; 4.12 Висновки

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 колаборативних робіт маніпуляторів та їх характеристик	02.09.2025-15.09.2025	виконано
2	Аналіз методів взаємодії та керування колаборативними роботами маніпуляторами	16.09.2025-28.09.2025	виконано
3	Аналіз методів ідентифікації людини	29.09.2025-05.10.2025	виконано
4	Розроблення архітектури програмного модуля	06.10.2025-11.10.2025	виконано
5	Розроблення моделі та метода ідентифікацій оператора	12.10.2025-26.10.2025	виконано
6	Розроблення алгоритму роботи програмного модуля	27.10.2025-08.11.2025	виконано
7	Розроблення функцій ідентифікації оператора	09.11.2025-19.11.2025	виконано
8	Постановка задач експерименту та аналіз отриманих результатів	20.11.2025-02.12.2025	виконано
9	Оформлення пояснювальної записки	03.12.2025-07.12.2025	виконано

Дата видачі завдання 01.09.2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

Леон МОЛОЖАНОВ

(власне ім'я, прізвище)

проф. Віктор КОСЕНКО

(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 73 с., 5 табл., 14 рис., 3 дод., 17 джерел.

КОЛАБОРАТИВНИЙ РОБОТ-МАНІПУЛЯТОР, ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОПЕРАТОРА, ФІЛЬТР КАЛМАНА, НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ, YOLO V8, АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ, ЛЮДИНО-МАШИНА ВЗАЄМОДІЯ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ВИРОБНИЧІ СИСТЕМИ.

Мета роботи – вдосконалення метода ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора, за рахунок оцінки траєкторії за допомогою фільтру Калмана.

Об'єкт дослідження – процес ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора.

Предмет дослідження – математичні моделі, методи та алгоритми ідентифікації людини.

В кваліфікаційній роботі було проведено аналіз колаборативних роботів маніпуляторів та їх характеристик. Проаналізовано методи взаємодії та керування колаборативними роботами маніпуляторами та аналіз методів ідентифікації людини. Розробили архітектуру програмного модуля. Було розроблено модель та метод ідентифікації оператора. Розроблено алгоритм роботи програмного модуля. Провели вибір мови та середовища розробки, розробили функції ідентифікації оператора. Провели постановку задач експерименту, експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів.

Результати, отримані при написанні кваліфікаційної роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме 9.5. Створити фінансову та інституційну системи (інноваційну інфраструктуру), що забезпечуватимуть розвиток наукових досліджень та науковотехнічних (експериментальних) розробок.

ABSTRACT

Explanatory note: 73 p., 5 tables, 14 figures, 3 appendices, 17 sources.

COLLABORATIVE ROBOT-MANIPULATOR, OPERATOR IDENTIFICATION, KALMAN FILTER, NEURAL NETWORKS, YOLO V8, AUTOMATED CONTROL, HUMAN-MACHINE INTERACTION, INTELLECTUAL PRODUCTION SYSTEMS.

The purpose of the work is to improve the method of operator identification in the working area of a collaborative robot manipulator, by estimating the trajectory using the Kalman filter.

The object of the study is the process of operator identification in the working area of a collaborative robot manipulator.

The subject of the study is mathematical models, methods and algorithms for human identification.

The qualification work analyzed collaborative robot manipulators and their characteristics. Methods of interaction and control of collaborative robots with manipulators and analysis of human identification methods were analyzed. The architecture of the software module was developed. A model and method of operator identification were developed. The algorithm of the software module was developed. The language and development environment were selected, operator identification functions were developed. The experimental tasks were formulated, experimental studies were conducted and the results were analyzed.

The results obtained when writing the qualification work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 "Industry, Innovation and Infrastructure", namely 9.5. Create a financial and institutional system (innovation infrastructure) that will ensure the development of scientific research and scientific and technical (experimental) developments.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	9
Вступ.....	10
1 Аналіз моделей та методів взаємодії та керування колаборативними роботами маніпуляторами	12
1.1 Аналіз колаборативних роботів маніпуляторів та їх характеристик... 12	12
1.2 Аналіз методів взаємодії та керування колаборативними роботами маніпуляторами	14
1.3 Аналіз методів ідентифікації людини.....	16
1.4 Постановка задач досліджень	18
2 Розроблення моделі та метода ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора	20
2.1 Розроблення архітектури програмного модуля	20
2.2 Розроблення моделі ідентифікації оператора	25
2.3 Розроблення метода ідентифікації оператора	34
2.4 Розроблення алгоритму роботи програмного модуля.....	37
2.5 Висновки до 2 розділу	40
3 Розроблення програмного модуля ідентифікації оператора та експериментальні дослідження.....	41
3.1 Вибір мови та середовища розробки.....	41
3.2. Розроблення функцій ідентифікації оператора.....	45
3.3 Постановка задач експерименту та аналіз отриманих результатів.....	49
3.4 Охорона праці.....	53
3.5 Висновки до 3 розділу	55
Висновки	56
Перелік джерел посилання	58
Додаток А Лістинг програми	61
Додаток Б Апробація результатів кваліфікаційної роботи.....	65

Додаток В Демонстраційний матеріал.....	72
---	----

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CNN – згорткові нейронні мережі;

Cobot – колаборативний робот;

ROI – region of interest.

ВСТУП

Актуальність розробки зумовлена зростанням потреби у підвищенні безпеки та ефективності взаємодії людини з колаборативними роботами, які все ширше застосовуються в промисловості, логістиці та сервісних сферах. Однією з ключових проблем під час спільної роботи оператора та робота-маніпулятора є точна і своєчасна ідентифікація положення людини в робочій зоні для запобігання небезпечним ситуаціям і підвищення продуктивності процесу. Існуючі методи ідентифікації часто не забезпечують достатньої точності та стійкості до шумів і перешкод. Використання фільтра Калмана для оцінки траєкторії руху оператора дозволяє підвищити надійність і швидкодію системи, забезпечуючи адаптивне реагування колаборативного робота на дії людини.

Використання класичних методів без урахування динамічної поведінки оператора та контексту середовища не дозволяє досягти достатнього рівня адаптивності та швидкості реагування. Тому виникає потреба у створенні методу, який базується на інтеграції нейронних мереж, математичних моделей руху та функцій ризику, що дозволяє не лише ідентифікувати оператора з високою точністю, але й прогнозувати його подальшу траєкторію та адаптувати дії робота в режимі реального часу.

Мета роботи – вдосконалення метода ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора, за рахунок оцінки траєкторії за допомогою фільтра Калмана.

Об'єкт дослідження – процес ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора.

Предмет дослідження – математичні моделі, методи та алгоритми ідентифікації людини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз колаборативних роботів маніпуляторів та їх характеристики;

- провести аналіз методів взаємодій та керування колаборативних роботів маніпуляторів;
- провести аналіз методів ідентифікації людини;
- розробити архітектуру програмного модуля;
- розробити модель ідентифікацій оператора;
- розробити метод ідентифікації оператора;
- розробити алгоритм роботи програмного модуля;
- провести вибір мови та середовища розробки;
- розробити функції ідентифікації оператора;
- провести постановку задач експерименту та аналіз отриманих результатів.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008–15 [1], методичних вказівок [2], та з використанням статей та матеріалів із наукових публікацій. Отримано апробацію на міжнародній конференції [3].

1 АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДІВ ВЗАЄМОДІЇ ТА КЕРУВАННЯ КОЛАБОРАТИВНИМИ РОБОТАМИ МАНІПУЛЯТОРАМИ

1.1 Аналіз колаборативних роботів маніпуляторів та їх характеристик

Колаборативний робот (cobot) є різновидом промислового робота-маніпулятора, спеціально розробленого для безпечної спільної роботи з людиною в одному робочому просторі без необхідності повного фізичного відокремлення. Його основна концепція полягає не в заміні оператора, а в доповненні його можливостей, підвищуючи продуктивність та зменшуючи фізичне навантаження під час виконання рутинних або небезпечних операцій. Якщо порівнювати традиційних промислових маніпуляторів, вони на відміну від колаборативних роботів, зазвичай працюють у повністю ізольованих зонах, оскільки не мають вбудованих засобів безпечної взаємодії з людиною, а їхня конструкція орієнтована на максимальну швидкість, потужність і точність, що робить їх потенційно небезпечними при безпосередній роботі поруч з оператором [4].

Ключові технічні характеристики колаборативних роботів-маніпуляторів визначають можливості їх застосування, рівень безпеки взаємодії з оператором та ефективність інтеграції у виробничі процеси. Аналіз цих параметрів є необхідним етапом під час вибору або проектування роботизованої системи, оскільки кожна характеристика безпосередньо впливає на продуктивність, точність та стабільність роботи робота в умовах спільного робочого простору з людиною. Однією з основних характеристик є корисна вантажопідйомність, яка визначає максимальну масу інструмента та об'єкта маніпуляції, що може безпечно переміщуватися роботом. Для колаборативних роботів цей показник зазвичай знаходиться в межах від 3 кг до 25 кг, що обумовлено необхідністю обмеження інерційних сил під час контакту з людиною. При виборі робота вантажопідйомність має визначатися з урахуванням запасу, оскільки

перевищення допустимих значень призводить до зниження точності, зростання зносу приводів та підвищення ризиків аварійних ситуацій.

Ще однією важливою характеристикою є робочий радіус або досяжність маніпулятора, що визначає максимальну відстань від основи робота до точки виконання операції. Даний параметр впливає на планування робочої зони, розташування обладнання та можливість обслуговування кількох робочих позицій одним роботом. Для *robot*'ів типовими є значення робочого радіуса від 600 мм до 2000 мм, при цьому збільшення досяжності часто супроводжується зменшенням допустимої вантажопідйомності. Кількість ступенів свободи є ще однією визначальною характеристикою, яка відображає здатність робота виконувати складні просторові рухи та орієнтувати робочий інструмент. Більшість колаборативних роботів мають шість або сім ступенів свободи, що забезпечує достатню маневреність для виконання завдань складання, пакування та обслуговування обладнання, а наявність сьомого ступеня свободи дозволяє уникати кінематичних сингулярностей і підвищує гнучкість планування траєкторій [5].

Точність позиціонування та повторюваність рухів є критичними параметрами для операцій, що вимагають високої прецизійності. Повторюваність характеризує здатність робота багаторазово повертатися в одну й ту саму точку з мінімальним відхиленням і для сучасних *robot*'ів зазвичай становить від $\pm 0,01$ мм до $\pm 0,1$ мм. Саме повторюваність, а не абсолютна точність, є ключовим показником для більшості виробничих застосувань, зокрема у збірці та контролі якості.

Важливою особливістю колаборативних роботів є обмеження швидкості та динамічних параметрів руху. Максимальна швидкість ланок і прискорення навмисно знижені порівняно з традиційними промисловими роботами для зменшення енергії можливого зіткнення. При цьому більшість *robot*'ів підтримують декілька режимів роботи, зокрема режим зниженої швидкості для спільної роботи з людиною та швидший режим для автономних операцій.

Сенсорне оснащення є ключовим елементом безпечної взаємодії людини з колаборативним роботом. До нього належать вбудовані енкодери, датчики крутного моменту в суглобах, а також зовнішні сенсори – камери, лазерні сканери або ToF-датчики, так як саме на основі даних із сенсорів реалізуються функції виявлення контакту, оцінки положення оператора та формування команд зупинки або сповільнення руху. Останньою важливою характеристикою є програмне забезпечення та комунікаційні можливості робота. Сучасні колаборативні маніпулятори підтримують промислові протоколи обміну даними, інтеграцію з PLC, SCADA та середовищами на базі ROS, а також мають відкриті API та SDK для розробки власних алгоритмів керування. Це забезпечує гнучкість системи, можливість впровадження методів комп'ютерного зору, фільтрації траєкторій і інтелектуальної обробки даних, що є особливо актуальним для задач ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота-маніпулятора [6].

1.2 Аналіз методів взаємодії та керування колаборативними роботами маніпуляторами

Ефективна та безпечна експлуатація колаборативних роботів-маніпуляторів безпосередньо залежить від обраних методів взаємодії з оператором і алгоритмів керування рухом. На відміну від традиційних промислових роботів, де основна увага приділяється точності та швидкості виконання циклів, у колаборативних системах пріоритетом є безпека людини, адаптивність до змін середовища та інтуїтивність керування, тому сучасні методи керування robot'ами поєднують класичні підходи робототехніки з алгоритмами сенсорної обробки та інтелектуального аналізу даних.

Початковим і базовим рівнем взаємодії є позиційне керування, при якому рух маніпулятора здійснюється за заздалегідь визначеними траєкторіями або заданими точками у просторі. Такий підхід широко використовується у стандартних виробничих операціях, де середовище є добре структурованим і

передбачуваним. Однак у контексті колаборативної робототехніки чисте позиційне керування має обмеження, оскільки не враховує можливі непередбачувані дії оператора та не дозволяє адекватно реагувати на фізичний контакт [7].

Для подолання цих обмежень застосовується керування за силою та моментом, яке базується на безперервному вимірюванні контактних зусиль між роботом і середовищем. У цьому випадку маніпулятор може змінювати свою траєкторію або швидкість у відповідь на прикладену оператором силу, що дозволяє реалізувати м'яку взаємодію та виконувати операції з дотиком. Такий підхід є ключовим для безпечної співпраці людини з роботом, проте вимагає високої точності датчиків та складних алгоритмів фільтрації вимірювань.

Подальшим розвитком силового керування є імпедансне та адмітансне керування, які моделюють поведінку робота у вигляді пружинно-демпферної системи. Імпедансне керування регулює реакцію робота на зовнішні сили, задаючи бажану "жорсткість" взаємодії, тоді як адмітансне керування перетворює прикладену силу на відповідний рух. Ці методи дозволяють налаштовувати рівень чутливості робота до дій оператора та широко застосовуються у колаборативних сценаріях складання, навчання рухів і ручного ведення маніпулятора [8].

Важливим аспектом взаємодії є режими навчання та програмування, зокрема метод навчання шляхом демонстрації. У цьому режимі оператор фізично переміщує маніпулятор уздовж бажаної траєкторії, а система запам'ятовує відповідні позиції та дії. Такий підхід значно спрощує процес налаштування робота, знижує вимоги до кваліфікації персоналу та підвищує гнучкість виробничих процесів, однак потребує додаткових механізмів перевірки безпеки збережених траєкторій.

Окрему групу методів становлять візуально-орієнтовані методи керування, або *visual servoing*, які використовують дані з камер для корекції рухів робота в реальному часі. Завдяки цьому маніпулятор може адаптувати свої дії до зміни положення об'єктів або оператора, що є особливо актуальним у динамічних

колаборативних середовищах. Недоліком таких методів є залежність від умов освітлення та обчислювальна складність обробки зображень, що може призводити до затримок у реакції системи [9].

Значну роль у забезпеченні безпеки відіграють методи керування на основі зон безпеки та обмежень швидкості. У цьому підході робочий простір поділяється на зони з різними допустимими параметрами руху: при наближенні оператора робот автоматично зменшує швидкість або переходить у режим зупинки. Такі методи часто поєднуються з системами ідентифікації та відстеження оператора, що дозволяє реалізувати адаптивне керування залежно від траєкторії руху людини.

Сучасні тенденції розвитку колаборативної робототехніки пов'язані з використанням інтелектуальних та адаптивних алгоритмів керування, зокрема методів машинного навчання та прогнозування рухів оператора. Ці підходи дозволяють не лише реагувати на дії людини, але й передбачати їх, що значно підвищує плавність взаємодії та рівень безпеки. Водночас застосування таких методів потребує надійних механізмів валідації та контролю, оскільки помилки у прогнозуванні можуть мати критичні наслідки [10].

1.3 Аналіз методів ідентифікації людини

Ідентифікація людини є ключовим елементом забезпечення безпеки, адаптивності та ефективності роботи колаборативних роботів-маніпуляторів. На відміну від традиційних промислових систем, де людина фізично ізольована від робочої зони робота, у колаборативних середовищах необхідне постійне розпізнавання присутності, положення, стану та дій оператора. Це вимагає використання надійних методів ідентифікації, здатних працювати в реальному часі та в умовах динамічного виробничого середовища [11].

Першу групу методів становлять візуальні методи ідентифікації, що базуються на обробці зображень і відеопотоків з камер. До них належать алгоритми розпізнавання силуету людини, детекції обличчя, скелетної моделі

(pose estimation), а також методи глибокого навчання, зокрема згорткові нейронні мережі (CNN). Перевагою візуальних методів є їх безконтактність та висока інформативність, оскільки вони дозволяють не лише виявити людину, а й оцінити її положення, позу та траєкторію руху. Водночас ефективність таких методів істотно залежить від умов освітлення, наявності перешкод у полі зору та обчислювальних ресурсів системи. Окреме місце серед візуальних методів займають методи глибинного бачення, що використовують стереокамери, RGB-D камери або лідари. Вони дозволяють визначати відстань між людиною та роботом, формувати тривимірну модель робочого простору та реалізовувати адаптивне керування швидкістю і траєкторією маніпулятора. Такі підходи суттєво підвищують рівень безпеки, однак потребують складнішої апаратної реалізації та ретельного калібрування сенсорів [12].

Другою групою є контактні та напівконтактні методи ідентифікації, що базуються на використанні датчиків сили, моменту, тактильних сенсорів та сенсорних поверхонь. У цьому випадку ідентифікація людини відбувається через фіксацію фізичного контакту або наближення до робота. Такі методи відзначаються високою надійністю в момент взаємодії, однак не дозволяють завчасно передбачити дії оператора та обмежують можливості превентивного реагування системи. До окремої категорії належать методи ідентифікації на основі носимих пристроїв, таких як RFID-мітки, браслети, датчики положення або інерційні вимірювальні модулі (IMU). Вони забезпечують високу точність визначення присутності конкретного оператора та його ідентифікацію як суб'єкта взаємодії. Основним недоліком таких методів є необхідність додаткового обладнання для персоналу, що може знижувати зручність експлуатації та гнучкість системи.

Перспективним напрямом є біометричні методи ідентифікації, зокрема розпізнавання обличчя, голосу або характерних рухів людини. У контексті колаборативної робототехніки ці методи можуть використовуватися для персоналізації взаємодії, налаштування режимів роботи робота та розмежування прав доступу. Водночас їх застосування супроводжується питаннями

конфіденційності, захисту персональних даних та стабільності роботи в промислових умовах [13].

Суттєвою проблемою при реалізації методів ідентифікації людини є поєднання точності, швидкодії та надійності. Алгоритми повинні працювати в реальному часі, не створювати затримок у системі керування та коректно функціонувати за наявності шумів, часткових перекриттів та змін у навколишньому середовищі. Це особливо критично для задач безпеки, де помилка ідентифікації може призвести до аварійних ситуацій. Найбільш ефективним підходом у сучасних колаборативних системах є мультисенсорна ідентифікація, яка поєднує кілька методів одночасно, наприклад візуальні дані, інформацію з датчиків сили та носимих пристроїв, такий підхід дозволяє компенсувати недоліки окремих методів і підвищити загальну надійність системи [14].

1.4 Постановка задач досліджень

Після проведеного аналізу, з урахуванням мети роботи, що полягає у підвищенні рівня безпеки та ефективності взаємодії людини з колаборативним роботом-маніпулятором шляхом розроблення програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні, у дослідженні було сформульовано ряд задач, які необхідно виконати.

Першим етапом необхідно розробити архітектуру програмного модуля, яка забезпечує збір, обробку та аналіз вхідних даних, а також інтеграцію модуля ідентифікації з системою керування колаборативного робота. Архітектура повинна бути модульною, масштабованою та придатною для роботи в режимі реального часу. Наступною задачею є розроблення моделі ідентифікації оператора, що описує процес виявлення та розпізнавання людини в робочій зоні робота. У межах цієї задачі необхідно формалізувати вхідні параметри, ознаки ідентифікації та взаємозв'язки між ними з урахуванням динамічності середовища та можливих перешкод. Важливою складовою дослідження є

розроблення метода ідентифікації оператора, який базується на обраній моделі та забезпечує надійне й швидкодіє розпізнавання присутності та положення оператора, метод має враховувати вимоги до безпеки колаборативної взаємодії та обмеження апаратних і обчислювальних ресурсів. Окремою задачею є розроблення алгоритму роботи програмного модуля, що визначає послідовність обробки даних, прийняття рішень та формування керуючих впливів для системи роботизованого комплексу, алгоритм повинен забезпечувати стабільну роботу модуля в умовах реального виробничого процесу.

На заключному етапі необхідно розробити програмний модуль ідентифікації оператора, вибрати відповідну мову та середовище розробки, а також провести експериментальні дослідження, у межах експерименту необхідно сформулювати задачі випробувань, оцінити точність та швидкодію розробленого методу ідентифікації, а також виконати аналіз отриманих результатів для підтвердження ефективності запропонованих рішень.

2 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ТА МЕТОДА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОПЕРАТОРА В РОБОЧІЙ ЗОНІ КОЛАБОРАТИВНОГО РОБОТА МАНІПУЛЯТОРА

2.1 Розроблення архітектури програмного модуля

Розроблення архітектури програмного модуля є ключовим етапом забезпечення ефективної та безпечної взаємодії колаборативного робота-маніпулятора з оператором у спільному робочому середовищі. В умовах зростання вимог до адаптивності та гнучкості робототехнічних систем постає потреба у створенні універсальних програмних рішень, здатних своєчасно виявляти присутність людини та коректно ідентифікувати її дії. Саме архітектура програмного модуля визначає загальну логіку обробки даних, алгоритмічні залежності між функціональними блоками та спосіб інтеграції з іншими підсистемами керування. Вона дозволяє мінімізувати затримки обробки, підвищити точність ідентифікації та гарантувати високу надійність роботи всієї системи. Ретельне опрацювання архітектури забезпечує масштабованість та можливість подальшої модифікації модуля у разі зміни апаратної конфігурації або оновлення програмних компонентів. Застосування нейронної мережі в структурі модуля передбачає глибоке навчання моделі на великому обсязі даних, що суттєво підвищує якість розпізнавання оператора навіть у складних умовах освітлення та при часткових перекриттях. Таке рішення сприяє підвищенню рівня безпеки, оскільки робот отримує змогу своєчасно реагувати на появу людини та уникати потенційно небезпечних ситуацій. Крім того, обґрунтоване формування архітектури дозволяє створити відкритий інтерфейс для взаємодії з іншими модулями системи, забезпечуючи повну сумісність із загальною інфраструктурою керування. У результаті, правильно розроблена архітектура програмного модуля стає фундаментом для реалізації інтелектуальних функцій і підтримки високого рівня колаборативності робототехнічної системи. Виходячи з вище сказаного, в рамках теми дослідження кваліфікаційної роботи,

розроблено наступну архітектуру програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора, яка представлена на рисунку 2.1.

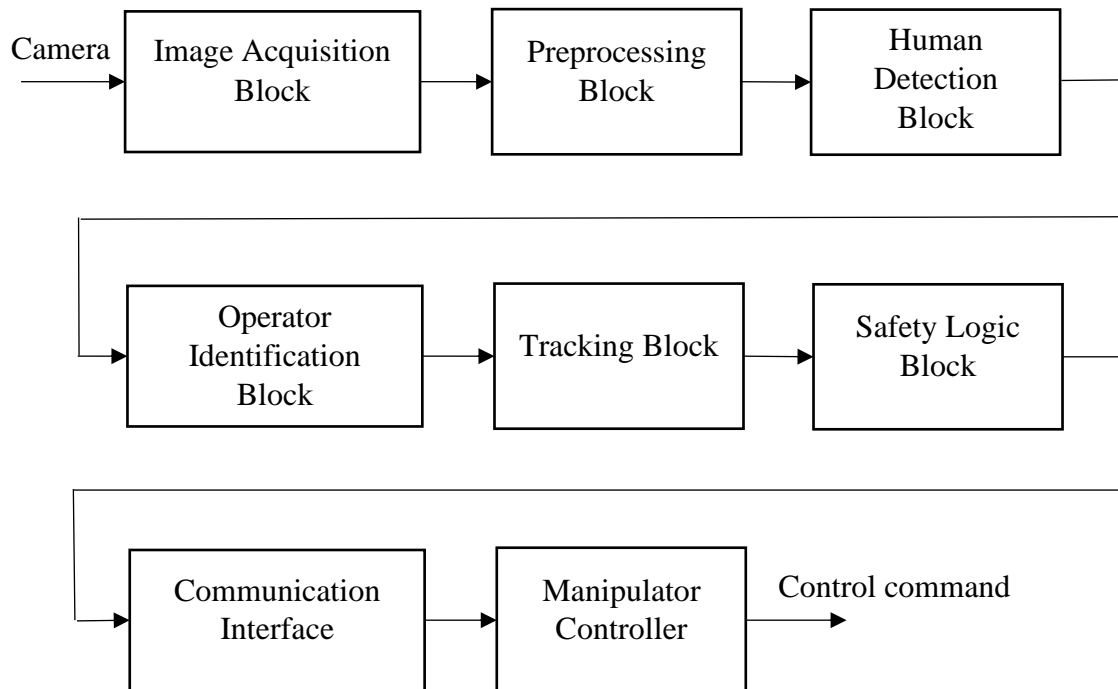


Рисунок 2.1 – Архітектура програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора

Опишемо призначення кожного блоку розробленої архітектури програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора (рис. 2.1) та тип інформації на виході кожного блоку, які представлено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Призначення кожного блоку розробленої архітектури програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні робота

Блоки архітектури	Призначення	Інформація на виході
1	2	3
Блок захвату зображень (Image Acquisition Block)	Отримання поточкових зображень із камер, встановлених у робочій зоні робота	Сирі кадри RGB або глибинні карти (залежно від типу камери)

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
Блок попередньої обробки (Preprocessing Block)	Нормалізація яскравості, шумозниження, вирівнювання кольору, а також виділення ROI (Region of Interest), де потенційно може знаходитися оператор	Попередньо оброблені кадри, підготовлені для подачі в нейронну мережу
Блок детекції людини (Human Detection Block)	Виявлення фігури людини у кадрі за допомогою детекторів (наприклад, YOLO або MediaPipe)	Координати bounding box людини, маска сегментації (опційно)
Блок ідентифікації оператора (Operator Identification Block)	Класифікація виявленого об'єкта як «оператор» або «інша особа», з використанням попередньо навчених нейронних мереж (ResNet, MobileNet, або кастомна CNN)	ID оператора, ймовірність (confidence score)
Блок трекінгу (Tracking Block)	Відслідковування положення оператора у реальному часі між кадрами для плавності та запобігання повторної помилкової ідентифікації	Оновлені координати оператора у просторі
Блок логіки безпеки (Safety Logic Block)	Формування сигналів про присутність оператора для системи керування роботом, генерація подій для зупинки чи обмеження руху маніпулятора	Безпечкові команди (наприклад: «Зупинити рух», «Обмежити швидкість», «Продовжити»)
Інтерфейс взаємодії (Communication Interface)	Передача стану ідентифікації та безпечових сигналів до контролера маніпулятора та (опційно) візуалізація для оператора	Команди управління, статуси ідентифікації

Передача даних між функціональними блоками архітектури програмного модуля ідентифікації оператора здійснюється у вигляді чітко визначених структур, що забезпечують коректну взаємодію та мінімізують затримки обробки (рис. 2.1 та табл. 2.1). На виході блоку захвату зображень передаються послідовні RGB-кадри розміром, наприклад, 1280 пікселів × 720 пікселів у

форматі масиву NumPy або у вигляді об'єкта типу cv::Mat, якщо використовується бібліотека OpenCV. Після попередньої обробки кадри передаються у форматі нормалізованих масивів із діапазоном значень пікселів від 0 до 1 або після перетворення в чорно-білу шкалу, якщо цього потребує модель нейронної мережі.

На етапі детекції людини дані передаються у вигляді координат прямокутника обгортання (bounding box), що визначаються чотирма значеннями: x , y , ширина та висота, а також маска сегментації у вигляді двовимірного бінарного масиву, яка позначає контур виявленої людини. Після цього блок ідентифікації оператора передає у наступний блок структурований словник або JSON-об'єкт, де зазначено унікальний ID оператора, ймовірність класифікації у відсотках або десяткове значення, а також часову мітку кадру для синхронізації. Блок трекінгу отримує оновлені координати центру маси або точки контролю (наприклад, положення голови чи грудної клітки), що дозволяє розраховувати траєкторію руху в просторі робочої зони та передавати її у вигляді масиву координат x , y , z із часовими відмітками. Далі блок логіки безпеки оперує логічними сигналами та статусами, де основними полями є поточний стан оператора (присутній чи відсутній), рівень ризику (низький, середній або високий) і запропонована дія для маніпулятора, що може кодуватися у вигляді числового або символічного прапорця. Нарешті, на виході комунікаційного інтерфейсу формуються структуровані пакети управління, які передаються контролеру маніпулятора по визначених протоколах (наприклад, MQTT, TCP/IP або власні низькорівневі команди), де передаються команда руху, обмеження швидкості, стан аварійної зупинки та інформаційні повідомлення про статус системи у текстовому або двійковому форматі. Така чітка структура даних між блоками гарантує узгодженість функціонування всієї системи та дозволяє гнучко масштабувати чи змінювати окремі компоненти без порушення цілісності архітектури.

Розроблена архітектура програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота-маніпулятора має низку важливих переваг,

що вигідно відрізняють її від класичних архітектур, застосовуваних у попередніх дослідженнях. Насамперед, запропонована модульна структура дозволяє чітко розділити функціональні блоки за їх призначенням, що підвищує керованість, прозорість та спрощує оновлення окремих компонентів без потреби повної перебудови системи. Використання нейронної мережі для ідентифікації оператора забезпечує значно вищу точність розпізнавання порівняно з традиційними методами, які зазвичай базуються на жорстких алгоритмах виявлення ознак або статичних фільтрах. Такий підхід дозволяє успішно працювати в умовах змінного освітлення, часткових перекриттів та варіацій зовнішнього вигляду оператора, що часто є слабким місцем класичних систем. Крім того, завдяки впровадженню блоку трекінгу вдалося досягти більш плавного та стабільного відстеження оператора у просторі, тоді як традиційні рішення переважно здійснюють повторну детекцію кожного кадру, що створює надлишкове навантаження на обчислювальні ресурси та підвищує ризик помилкових спрацьовувань. Інтеграція блоку логіки безпеки, який генерує команди для системи керування маніпулятора, надає системі динамічну реакцію на появу оператора та адаптацію поведінки робота відповідно до рівня ризику, чого часто не передбачають стандартні архітектури, де переважає фіксований набір реакцій.

У розробленій архітектурі передбачено стандартизовані формати обміну даними, що спрощує інтеграцію з іншими підсистемами керування та зовнішніми модулями моніторингу, тоді як класичні рішення здебільшого характеризуються закритими форматами або жорстко прив'язаними протоколами. Додатковою перевагою є підтримка масштабованості: запропонована структура дозволяє легко розширювати кількість камер, оновлювати моделі нейронних мереж або впроваджувати нові алгоритми без необхідності суттєвих змін архітектури загалом. Порівняно з класичними підходами, де оновлення часто потребує переробки всієї програмної логіки, запропоноване рішення демонструє високу гнучкість і технологічну готовність до подальшої еволюції. Така архітектура не лише підвищує безпеку та надійність взаємодії людини з роботом, а й створює

фундамент для впровадження нових інтелектуальних функцій, сприяючи розвитку більш адаптивних і когнітивних колаборативних систем [3].

2.2 Розроблення моделі ідентифікації оператора

Розроблення моделі ідентифікації оператора є ключовим етапом забезпечення безпечної та ефективної роботи колаборативного робота-маніпулятора в умовах спільної експлуатації з людиною. Сучасні виробничі та сервісні системи вимагають не лише високої точності позиціонування механічних вузлів, але й здатності оперативно реагувати на присутність оператора, запобігаючи аварійним ситуаціям і мінімізуючи ризики травмування. У традиційних підходах часто використовуються спрощені методи виявлення людини на основі статичних ознак або фіксованих порогових значень, однак такі рішення не забезпечують необхідного рівня гнучкості та адаптивності в реальних динамічних середовищах. Запропонована модель передбачає глибоку обробку вхідних візуальних даних і дозволяє виділяти область інтересу навіть при наявності складних фонових перешкод і змінних умов освітлення. Виходячи з розробленої архітектури (рис. 2.1) з камери в розроблюваний програмний модуль поступає вхідний кадр, математичну модель якого можна описати як функцію інтенсивності світла:

$$I(x, y): \Omega \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3, \quad (2.1)$$

де $I(x, y)$ – функція, яка описує значення інтенсивності світла (яскравості та кольору) у кожній точці зображення, отриманого камерою, значення $I(x, y)$ є тривимірним вектором, що містить кольорову інформацію (RGB компоненти) у кожному пікселі;

x, y – координати пікселя у двовимірній площині зображення;

$\Omega \subset \mathbb{R}^2$ – область визначення функції I , яка представляє всю площу кадру або виділений фрагмент region of interest (ROI);

\mathbb{R}^3 – простір значень функції, тобто тривимірний простір кольорових компонентів, це вектор кольору (RGB), де кожна компонента приймає значення у діапазоні $[0, 255]$ (у 8-бітному зображенні) або $[0, 1]$ (якщо нормалізовано).

Функція (2.1) формалізує структуру кадру, який подається на вхід системи обробки. Дозволяє математично описати будь-які перетворення кадру, наприклад, виділення контурів, фільтрацію кольорів, сегментацію або нормалізацію. Завдяки такому опису кожного параметра можна побудувати коректні математичні моделі для виділення оператора та подальшої ідентифікації.

Для виділення ROI (region of interest) пропонується застосувати оператор сегментації:

$$S(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } I(x, y) \in T \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}, \quad (2.2)$$

де $S(x, y)$ – бінарна функція (маска сегментації), яка визначає, чи належить піксель (x, y) до області інтересу (ROI). Наприклад: $S(x, y) = 1$ означає, що піксель є частиною ROI (наприклад, контур оператора або його частини), або $S(x, y) = 0$ означає, що піксель не належить до ROI і не використовується для подальшої обробки;

x, y – координати пікселя у двовимірному просторі зображення, визначають положення кожного пікселя, для якого обчислюється значення функції сегментації S ;

$I(x, y)$ – функція, яка описує значення інтенсивності світла (яскравості та кольору) у кожній точці зображення, отриманого камерою;

T – множина допустимих характеристик пікселів, які визначають ROI. Може включати діапазони кольору (наприклад, яскравості, текстурні або просторові ознаки). Формально може бути описано наступним виразом:

$$I(x, y) \in T \Leftrightarrow \text{піксель задовольняє умову відбору}, \quad (2.3)$$

або T може бути задано умовами:

$$R_{min} \leq R \leq R_{max}, G_{min} \leq G \leq G_{max}, B_{min} \leq B \leq B_{max}. \quad (2.4)$$

Модель (2.2) дозволяє побудувати маску сегментації, виділити лише ті ділянки зображення, які є потенційно важливими для подальшого аналізу (зокрема для детекції та ідентифікації оператора). За допомогою $S(x, y)$ можна локалізувати область кадру, де знаходиться людина, відкидаючи зайві частини фону, тим самим зменшуючи обсяг обробки та підвищуючи точність наступних кроків (класифікація, трекінг тощо).

Тобто моделі (2.1)-(2.2) дають можливість виділити ділянку кадру, де ймовірно знаходиться оператор, зменшуючи обсяг даних для подальшої обробки.

Модель розпізнання людини, пропонується використовувати детектор об'єктів (наприклад, на основі YOLO), який буде представлено наступною функцією:

$$D(I) = \{B_i\}_{i=1}^N, \quad (2.5)$$

де $D(I)$ – функція детекції людини, яка на основі вхідного зображення I повертає набір знайдених об'єктів, у нашому випадку – ймовірних областей, де знаходиться людина. Формально ця функція реалізується, наприклад, за допомогою алгоритмів типу YOLO, SSD або Faster R-CNN, які виявляють фігури людини у кадрі;

I – вхідне зображення, тобто кадр із камери після попередньої обробки або безпосередньо сирий кадр, містить усю візуальну інформацію про поточну сцену (наприклад, всю робочу зону);

N – кількість виявлених областей, де можуть знаходитися люди, показує, скільки різних об'єктів (людей) було знайдено на кадрі, наприклад $N = 1$ – якщо в кадрі лише один оператор;

B_i – i -та рамка (bounding box), яка локалізує знайдений об'єкт (людину) у кадрі, при цьому кожна B_i описується наступними параметрами:

$$B_i = (x_i, y_i, w_i, h_i, c_i), \quad (2.6)$$

де x_i – координата верхнього лівого кута рамки по горизонталі;

y_i – координата верхнього лівого кута рамки по вертикалі;

w_i – ширина рамки;

h_i – висота рамки;

c_i – ймовірність або ступінь впевненості, що всередині рамки дійсно є людина (confidence score), значення в діапазоні $[0,1]$.

Функція (2.5) формалізує процес автоматичного пошуку людини у кадрі. Вона дозволяє отримати точні координати всіх знайдених об'єктів, щоб далі передати ці області на класифікацію для визначення, чи є виявлена людина саме оператором. Завдяки структурованим рамкам B_i система чітко знає, де саме у зображенні потрібно проводити подальший аналіз, не обробляючи зайві ділянки. Внаслідок цього це дає можливість автоматично локалізувати всі можливі об'єкти-люди в кадрі для подальшої ідентифікації.

Математична модель ідентифікації оператора, представляє собою, що кожен сегмент (рамка B_i) подається на вхід нейронної мережі:

$$f_{\theta}: \mathbb{R}^{W \times H \times 3} \rightarrow [0,1], \quad (2.7)$$

де f_{θ} – функція нейронної мережі, яка виконує класифікацію обрізаного фрагмента зображення (виділеної рамки B_i) та визначає ймовірність того, що знайдена людина є оператором, тобто функція f_{θ} представляє всю модель (наприклад, ResNet, MobileNet, кастомну CNN), навченої на наборі даних, де оператори позначені окремим класом;

θ – вектор параметрів моделі, тобто всі налаштовані під час навчання коефіцієнти, містить тисячі параметрів (в залежності від архітектури), які

формують здатність мережі розпізнавати специфічні візуальні патерни, характерні для оператора;

$\mathbb{R}^{W \times H \times 3}$ – простір вхідних даних, тобто вхідний образ (обрізана рамка), поданий на мережу, де W – ширина вхідного фрагмента зображення після нормалізації (наприклад, 224 пікселів), H – висота вхідного фрагмента (наприклад, 224 пікселів), 3 – кількість кольорових каналів (RGB);

$[0,1]$ – діапазон значення вихідної ймовірності, яку видає мережа, тобто мережа повертає одне число – ймовірність того, що знайдена людина є саме оператором. Значення близьке до 1 означає високу впевненість мережі, що людина – оператор, а значення близьке до 0 – що це інша особа або помилкова детекція.

Модель (2.7) формалізує задачу бінарної класифікації: для кожної виділеної рамки (bounding box), де знайдена людина, потрібно визначити, чи це саме оператор. Після обчислення значення f_θ , система приймає рішення за допомогою порога, чи використовувати цей об'єкт для подальшого трекінгу та впливу на керування роботом.

У відповідь мережа видає ймовірність:

$$P_i = f_\theta(C(B_i)), \quad (2.8)$$

де P_i – ймовірність того, що i – та виявлена людина є саме оператором, число від 0 до 1, яке інтерпретується як ступінь впевненості мережі. Наприклад, $P_i = 0,92$, означає, що мережа з 92 % впевненістю вважає, що людина в рамці B_i – це оператор;

f_θ – нейронна мережа-класифікатор, яка аналізує вхідний фрагмент і видає ймовірність класу "оператор";

$C(B_i)$ – операція обрізання та підготовки зображення всередині рамки B_i для подачі в нейронну мережу, при цьому функція $C(\cdot)$ використовує наступні кроки: вирізає ділянку кадру, яка відповідає координатам (B_i); Масштабує цю

ділянку до фіксованого розміру (наприклад, 224 пікселів \times 224 пікселів); нормалізує піксельні значення (наприклад, переводить їх у діапазон [0, 1]);

B_i – i -та рамка (bounding box), яка локалізує знайдений об'єкт (людину) у кадрі.

Для вирішення задачі класифікувати людину як «оператор» або «не оператор», пропонується використовувати бінарну класифікацію, де:

$$\hat{y}_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } P_i \geq \tau \\ 0, & \text{якщо } P_i \leq \tau \end{cases}, \quad (2.9)$$

де τ – порогове значення (наприклад, 0,8).

Для визначення положення оператора, пропонується використовувати модель трекінгу (оцінка траєкторії), що описується як траєкторія в просторі:

$$\mathbf{r}(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T, \quad (2.10)$$

оцінка траєкторії базується на фільтрі Калмана:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \\ \mathbf{z}_k &= \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \end{aligned} \quad (2.11)$$

де $\mathbf{r}(t)$ – вектор положення оператора у тривимірному просторі в момент часу t , що вказує точне місцезнаходження оператора відносно системи координат робота або робочої зони;

$x(t), y(t), z(t)$ – координата по осі X , тобто положення оператора по горизонталі, координата по осі Y , тобто положення по глибині та координата по осі Z , тобто висота оператора, що може вказувати положення голови або центру маси, залежно від моделі трекінгу;

\mathbf{x}_k – вектор стану системи на момент часу t , в рамках даних досліджень він зазвичай має вигляд:

$$\mathbf{x}_k = [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}], \quad (2.12)$$

де x, y, z – координати положення;

$\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ – швидкості за відповідними осями;

A – матриця динаміки стану, яка описує, як стан системи переходить із попереднього кроку $k - 1$ у поточний крок k ;

\mathbf{w}_{k-1} – шум процесу, який враховує невизначеності або неточності динамічної моделі, дає можливість моделювати випадкові відхилення або зміни руху оператора;

\mathbf{z}_k – вектор вимірювань, який отримуємо від сенсорів або візуальної системи на кроці k , містить координати, отримані безпосередньо із камер чи системи візуального трекінгу;

H – матриця спостереження, яка визначає, як із поточного стану \mathbf{x}_k отримати вимірювані параметри \mathbf{z}_k , якщо вимірюються тільки позиції, а не швидкості, то матриця H "вибирає" відповідні координати з вектора стану;

\mathbf{v}_k – шум вимірювання, який моделює похибки або шуми від камер і сенсорів, він враховує, наприклад, випадкові флуктуації координат через погану освітленість чи помилки обробки.

Модель фільтра Калмана дозволяє поєднати модель руху (динаміку) та реальні вимірювання, щоб отримати згладжену та більш точну оцінку положення і швидкості оператора. У результаті ми отримуємо плавну траєкторію $\mathbf{r}(t)$ (2.10), яка не піддається різким стрибкам або шуму від системи комп'ютерного зору, що є важливим для побудови прогнозів руху оператора та забезпечення динамічної безпеки роботи маніпулятора.

Враховуючи, що дані дослідження стосуються колаборативних роботів, то необхідно розробити модель безпечної взаємодії людини та робота, на базі функцій ризику:

$$R(t) = f_t(\mathbf{r}(t), \mathbf{r}_r(t)), \quad (2.13)$$

де $R(t)$ – оцінка рівня ризику взаємодії між роботом-маніпулятором і оператором у момент часу t , це числове значення, яке відображає, наскільки близько оператор знаходиться до робота та наскільки потенційно небезпечним є його положення;

$f_t(\cdot)$ – функція ризику, яка математично моделює залежність ризику від просторових положень оператора та робота, може бути реалізована у вигляді експоненціальної функції від відстані, Гауссової функції або іншої метрики, що враховує конфігурацію маніпулятора та положення людини;

$\mathbf{r}(t)$ – вектор положення оператора у тривимірному просторі в момент часу t , представлено в (2.11);

$\mathbf{r}_r(t)$ – поточне положення робота-маніпулятора у момент часу t , вказує положення кінцевого ефектора або іншої критичної частини робота, яка може представляти небезпеку для оператора.

Функція ризику може бути визначена як:

$$R(t) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_r(t)\|^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.14)$$

де $\exp(\cdot)$ – експоненціальна функція, яка використовується для плавного зниження значення ризику при збільшенні відстані між оператором і роботом, а також дозволяє моделювати ризик як швидко спадний при віддаленні оператора від робота;

$\|\mathbf{r}(t) - \mathbf{r}_r(t)\|^2$ – квадрат евклідової відстані між поточним положенням оператора та робота;

$\mathbf{r}(t)$ – вектор положення оператора у тривимірному просторі в момент часу t , представлено в (2.11);

$\mathbf{r}_r(t)$ – поточне положення робота-маніпулятора у момент часу t , вказує положення кінцевого ефектора або іншої критичної частини робота, яка може представляти небезпеку для оператора;

σ – параметр масштабу (дисперсії), який регулює "зону чутливості" ризику, тобто чим менше значення σ , тим швидше ризик $R(t)$ спадає при

віддаленні від робота. При великому σ зона ризику розширюється, тобто навіть при більшій відстані оператор сприймається як потенційно небезпечний.

Внаслідок чого, систему прийняття рішень про дію робота можна представити у вигляді наступної системи:

$$u(t) = \begin{cases} \text{Зупинити, } R(t) > \xi_1 \\ \text{Обмежити швидкість, } \xi_2 < R(t) \leq \xi_1, \\ \text{Продовжити, } R(t) \leq \xi_2 \end{cases} \quad (2.15)$$

де ξ_1 та ξ_2 – порогові значення ризику.

Модель обміну даними пропонується представити у вигляді наступного пакета:

$$P = \{\mathbf{r}(t), P_i, \hat{y}_i, R(t), u(t), t\}, \quad (2.16)$$

де $\mathbf{r}(t)$ – поточне положення оператора у робочій зоні в момент часу, t ;

P_i – ймовірність того, що i -та знайдена людина є оператором;

\hat{y}_i – ідентифікаційний маркер або передбачений клас i -ї людини, визначений мережею;

$R(t)$ – оцінка ризику взаємодії у момент часу t ;

$u(t)$ – керуючий вплив або команда для робота, сформована з урахуванням усіх попередніх параметрів;

t – мітка часу, яка забезпечує синхронізацію обміну даними між підсистемами.

Пакет P (2.16) є універсальним контейнером даних, що передається між модулями системи: від модуля ідентифікації до модуля планування руху та керування роботом. Кожен параметр несе критично важливу інформацію, таку як положення оператора ($\mathbf{r}(t)$), ймовірність та ідентифікація (P_i, \hat{y}_i), ризик ($R(t)$), управління $u(t)$ та часову прив'язку (t). Завдяки такій структурі забезпечується цілісність, узгодженість і своєчасна реакція системи на зміну стану робочої зони.

Розроблені моделі, функції та системи мають суттєві переваги для ефективного вирішення задачі ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора. Вони дозволяють отримати високоточні просторові координати оператора в режимі реального часу та враховувати його траєкторію, що підвищує безпеку та передбачуваність взаємодії. Використання нейронної мережі забезпечує гнучкість у розпізнаванні операторів навіть при варіативних позах чи умовах освітлення, зменшуючи ймовірність помилкових спрацьовувань. Інтеграція функції ризику дозволяє роботу адаптивно реагувати на зміни положення людини, динамічно регулюючи свою поведінку й мінімізуючи ризик зіткнень. Модель фільтра Калмана гарантує згладженість траєкторії та фільтрацію шумів, що особливо важливо для точного прогнозування руху оператора. Структурований пакет обміну даними оптимізує взаємодію між модулями системи, забезпечуючи синхронність рішень і своєчасну реакцію. Всі ці елементи створюють комплексну, надійну архітектуру, яка відповідає сучасним вимогам індустриальної безпеки та підвищує ефективність роботи колаборативного робота в середовищі з людиною.

2.3 Розроблення метода ідентифікації оператора

Розроблення методу ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора є важливим кроком для забезпечення безпечної та ефективної взаємодії між людиною й автоматизованою системою. Сучасні колаборативні роботи все частіше застосовуються у виробництві та сервісних завданнях, де необхідно точно розпізнавати та відстежувати оператора для запобігання аваріям і підвищення продуктивності. Використання класичних методів без урахування динамічної поведінки оператора та контексту середовища не дозволяє досягти достатнього рівня адаптивності та швидкості реагування. Тому виникає потреба у створенні методу, який базується на інтеграції нейронних мереж, математичних моделей руху та функцій ризику, що дозволяє не лише ідентифікувати оператора з високою точністю, але й

прогнозувати його подальшу траєкторію та адаптувати дії робота в режимі реального часу.

Такий підхід забезпечує гнучкість системи, знижує ризики зіткнення та покращує загальну ергономіку взаємодії. Метод стає основою для інтелектуального керування, де враховується поведінковий профіль оператора та поточна ситуаційна обстановка. Представимо розроблений метод ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота у вигляді наступних кроків:

- отримання вхідного зображення (вираз 2.1);
- детекція потенційних об'єктів людини (вираз 2.5);
- підготовка виділених ділянок $C(B_i)$;
- обчислення ймовірності приналежності до оператора (вираз 2.8);
- присвоєння класу (ідентифікація) $\hat{y}_i = \arg \max_y P(y|C(B_i), \theta)$;
- оцінка положення оператора у просторі (вираз. 2.10);
- оцінка траєкторії через фільтр Калмана (вираз 2.11);
- обчислення ризику (вираз. 2.14);
- формування керуючого пакета даних (вираз. 2.16);
- прийняття рішення роботом (вираз. 2.15).

Таким чином, метод включає послідовне використання запропонованих моделей: від вхідного зображення до прийняття рішення роботом у режимі реального часу. Він поєднує глибоку ідентифікацію на базі нейронної мережі, просторову оцінку за допомогою фільтра Калмана та динамічну оцінку ризику, формуючи комплексну, інтегровану архітектуру для підвищення безпеки і точності взаємодії. Блок схему розробленого метода представлено на рисунку 2.2.

Блок «Camera» призначений для захоплення вхідних візуальних даних у режимі реального часу, які слугують основою для подальшої обробки. Блок «Human Detection» відповідає за виділення всіх людей у кадрі за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору, забезпечуючи перший рівень розпізнавання присутності людини.

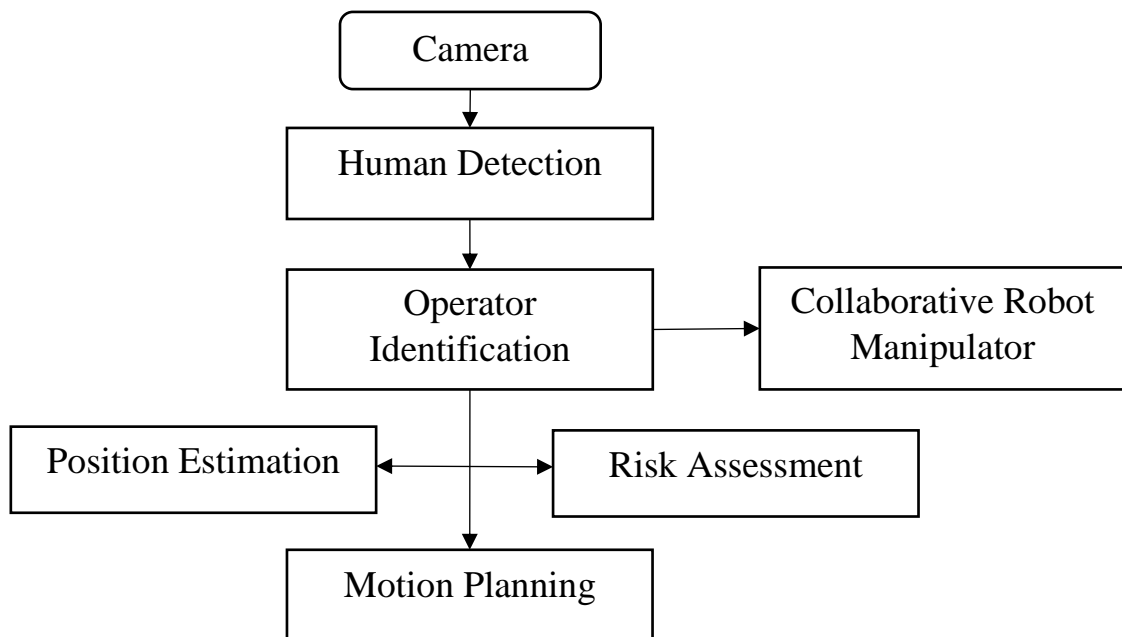


Рисунок 2.2 – Блок схема метода ідентифікації оператора

«Operator Identification» реалізує класифікацію знайдених людей та визначає, хто серед них є оператором, застосовуючи нейронну мережу для підвищення точності. Блок «Collaborative Robot Manipulator» відображає зв'язок між системою ідентифікації та роботом, який отримує інформацію про присутність оператора для подальшого планування дій. Далі «Position Estimation» визначає просторові координати оператора у тривимірному середовищі, що дозволяє точно оцінити його положення в робочій зоні. Блок «Risk Assessment» виконує розрахунок функції ризику на основі відстані між оператором і роботом, допомагаючи оцінити безпеку взаємодії. «Motion Planning» формує команди для керування рухом робота залежно від оціненого ризику та положення оператора. Завдяки такій послідовності, кожен блок виконує строго визначену роль у забезпеченні безпечної колаборативної роботи. Камера створює первинний інформаційний потік, який обробляється через каскад виявлення, ідентифікації та оцінки. Спеціалізовані модулі дозволяють перейти від простого розпізнавання до прийняття конкретних рішень керування. Ця структура забезпечує адаптивну й гнучку взаємодію між людиною та роботом. Присутність модулів оцінки ризику та планування руху гарантує дотримання високих стандартів безпеки. У результаті система здатна працювати

в режимі реального часу та своєчасно реагувати на будь-які зміни у поведінці оператора, а такий підхід дозволяє мінімізувати небезпеки та підвищити ефективність спільної роботи.

2.4 Розроблення алгоритму роботи програмного модуля

Розроблення алгоритму роботи програмного модуля ідентифікації оператора є важливим етапом для забезпечення безпечної та ефективної взаємодії людини та колаборативного робота маніпулятора. Сучасні виробничі середовища вимагають постійної присутності людини в зоні роботи автоматизованих систем, що створює потенційні ризики травм і помилкових маніпуляцій. Тому виникає необхідність створення інтелектуального алгоритму, здатного швидко й точно розпізнавати оператора серед інших об'єктів, аналізувати його просторове положення та передбачати подальші дії для своєчасного корегування траєкторії робота. Запропонований алгоритм поєднує глибинні нейронні мережі для класифікації та ідентифікації людини, математичні моделі для обчислення координат і швидкості руху, а також функцію оцінки ризику для формування адаптивної реакції системи. Він дозволяє створити динамічний і гнучкий підхід, який відповідає сучасним стандартам промислової безпеки та продуктивності. Розробка такого алгоритму обумовлена потребою у безпечному співіснуванні людини та робота, де відсутність ефективної ідентифікації може призвести до аварійних ситуацій. Використання комплексної логіки, математичних виразів і функцій ризику робить систему більш чутливою до змін поведінки оператора та гарантує оперативну реакцію навіть у складних сценаріях. Виходячи з цього пропонується наступний алгоритм ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора, який представлено на рисунку 2.3.

Алгоритм ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота-маніпулятора (рис. 2.3) починається з ініціалізації та захоплення кадру з камери, що дозволяє отримати актуальну інформацію про середовище навколо робота.

Далі система переходить до етапу виявлення людей у кадрі, де застосовуються алгоритми комп'ютерного зору та детектори на основі нейронних мереж для локалізації всіх потенційних об'єктів людини. Після цього виконується ідентифікація оператора серед виявлених людей, що дозволяє відокремити основного користувача від сторонніх осіб чи інших робітників. На цьому етапі використовується модель, яка оцінює ймовірність приналежності кожного об'єкта до класу «оператор» і формує остаточне рішення. Коли оператор визначений, система розраховує його положення у просторі та оцінює відстань до робота, що дає можливість динамічно контролювати ситуацію. Далі обчислюється ризик взаємодії оператора та робота за допомогою спеціальної експоненційної функції, яка враховує просторову відстань та прогнозовану траєкторію руху.

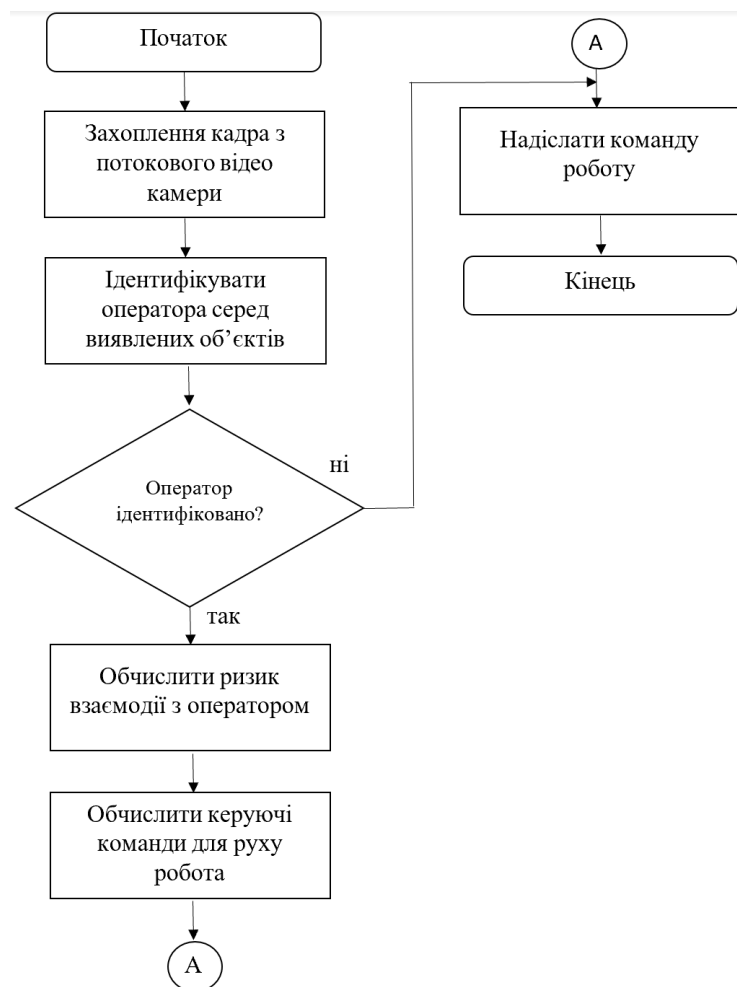


Рисунок 2.3 – Алгоритм ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора

Якщо ризик досягає критичних значень, система формує відповідні керуючі команди для зміни поведінки робота, наприклад, зупинку, уповільнення або відхилення траєкторії. Розраховані команди передаються до контролера робота для оперативного виконання. Після відправки команд виконується зворотний цикл, який повертає систему до нового захоплення кадру, дозволяючи безперервно оновлювати інформацію та адаптуватися до змін у реальному часі. Така циклічна структура забезпечує високу швидкість реагування та гнучкість управління, що є ключовим фактором безпечної колаборації. Алгоритм дозволяє системі постійно відслідковувати дії оператора та гарантувати його безпеку навіть при різких чи непередбачуваних рухах. Одночасно це створює умови для ефективного виконання виробничих завдань без зниження продуктивності. У підсумку, представлений алгоритм об'єднує потужні методи комп'ютерного зору, математичні моделі оцінки ризику та адаптивного планування руху, утворюючи комплексну систему контролю. Він побудований таким чином, щоб максимально точно і швидко реагувати на присутність та поведінку оператора в робочій зоні, тим самим підвищуючи рівень інтерактивної безпеки та оптимізуючи взаємодію між людиною та колаборативним роботом.

Розроблений алгоритм ідентифікації оператора має суттєві переваги в контексті дослідження безпечної взаємодії людини та колаборативного робота маніпулятора. Він забезпечує високу точність розпізнавання оператора навіть у складних умовах освітлення та при наявності інших об'єктів чи людей у кадрі. Завдяки використанню нейронних мереж алгоритм здатний адаптуватися до різних сценаріїв поведінки оператора та мінімізувати ймовірність помилкових визначень. Вбудований механізм оцінки ризику дозволяє прогнозувати небезпечні ситуації заздалегідь і своєчасно реагувати, підвищуючи загальний рівень безпеки. Безперервний циклічний режим роботи гарантує постійне оновлення інформації про просторове положення оператора, що дозволяє роботу швидко корегувати свої дії. Алгоритм інтегрує дані з модуля планування руху та контролера, створюючи єдину узгоджену систему прийняття рішень. Це сприяє гнучкому налаштуванню швидкості та траєкторії маніпулятора залежно від

поточної ситуації. Завдяки такій архітектурі система стає більш стійкою до непередбачуваних змін поведінки людини. Запропонований алгоритм суттєво підвищує рівень довіри до робототехнічних комплексів у середовищах спільної роботи, забезпечуючи не лише безпеку, а й ефективність виконання завдань.

2.5 Висновки до 2 розділу

У другому розділі було проведено комплексне дослідження, спрямоване на розроблення моделі та методу ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора. При описі архітектури програмного модуля обґрунтовано вибір структури системи та визначено ключові функціональні блоки, які забезпечують узгоджену взаємодію між модулями обробки даних, оцінки ризику та керування рухом. Під час розробки моделі ідентифікації оператора створено математичні вирази та системи, що дають змогу точно визначати просторове положення оператора, класифікувати його статус та оцінювати потенційний ризик взаємодії. Опис методу ідентифікації оператора деталізує послідовність дій, яка об'єднує отримання даних із камери, їх обробку та прийняття рішень про ідентифікацію, забезпечуючи безперервність і узгодженість роботи всієї системи. Алгоритм роботи програмного модуля представлено у вигляді чіткої структурованої логіки з використанням циклічної обробки та адаптивного планування команд для робота. Всі розроблені етапи формують єдину основу для створення інтелектуальної, безпечної та надійної системи розпізнавання оператора, яка дає змогу колаборативному роботу маніпулятору ефективно функціонувати в умовах спільної роботи з людиною, своєчасно реагуючи на зміни середовища та запобігаючи небезпечним ситуаціям.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО МОДУЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОПЕРАТОРА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Вибір мови та середовища розробки

Аналіз вибору мови програмування для розроблення програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора є надзвичайно важливим кроком, оскільки саме від цього залежить швидкість прототипування, доступність сучасних бібліотек для комп'ютерного зору та машинного навчання, легкість інтеграції з апаратною частиною та подальша підтримка.

Мова C++ вирізняється високою швидкодією та можливістю детального контролю апаратних ресурсів, що дозволяє реалізувати продуктивні рішення для систем реального часу, однак розробка алгоритмів комп'ютерного зору на C++ потребує більше часу і вимагає глибших технічних знань, що ускладнює процес впровадження. Java має хорошу кросплатформеність і стабільність, вона зручна для створення універсальних програмних середовищ, але менш ефективна для задач, пов'язаних із глибинним навчанням та комп'ютерним зором, і має обмежену кількість спеціалізованих бібліотек. Мова C# є популярною серед розробників промислових додатків і має потужну екосистему для створення інтерактивних графічних інтерфейсів, проте у сфері комп'ютерного зору та розроблення адаптивних інтелектуальних систем вона значно поступається через брак гнучких фреймворків і менш розвинену підтримку відкритих бібліотек.

У такому контексті Python є оптимальним вибором завдяки великій кількості потужних бібліотек для комп'ютерного зору (OpenCV, Mediarpipe), глибинного навчання (TensorFlow, PyTorch, Keras), обробки даних (NumPy, Pandas), а також завдяки простоті синтаксису та можливості швидко створювати прототипи. Python дозволяє легко тестувати нові методи, швидко оновлювати модельні підходи та забезпечує тісну інтеграцію з ROS (Robot Operating System),

що надзвичайно важливо для колаборативних роботів. Крім того, широка спільнота розробників та активна підтримка роблять Python найкращим варіантом для реалізації складних і динамічних систем. Завдяки своїй універсальності Python поєднує простоту, функціональність та гнучкість, що дає можливість зосередитися на точності алгоритмів та безпеці взаємодії замість витрат часу на низькорівневі деталі. У підсумку саме Python стає найбільш обґрунтованим рішенням для реалізації задач безпечної колаборації людини та робота, особливо в умовах високих вимог до адаптивності та розвитку технологій штучного інтелекту. В таблиці 3.1 представлено порівняння мов програмування для розроблення програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора.

Таблиця 3.1 – Порівняння переваг та недоліків мов програмування з точки зору розроблення програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора

Мова програмування	Переваги	Недоліки
C++	Висока швидкодія, детальний контроль	Складність реалізації, тривалий час розробки
Java	Кросплатформеність, стабільність	Обмежена підтримка CV та ML, менш гнучка інтеграція
C#	Зручні інтерфейси, підтримка промислових рішень	Менше фреймворків для CV/ML, обмежена гнучкість
Python	Багато бібліотек, простота, гнучкість	Нижча швидкодія (компенсується оптимізаціями)

Вибору середовища розробки для мови Python є ключовим етапом при створенні програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора, оскільки саме від обраного середовища залежить зручність роботи, ефективність налагодження коду, інтеграція із системами контролю версій та підтримка сучасних інструментів штучного інтелекту.

Середовище Visual Studio Code вирізняється великою кількістю розширень, легкістю налаштування та гарною інтеграцією з Git, однак воно часто потребує ручної конфігурації для повної підтримки Python і не завжди забезпечує достатньо глибокий аналіз коду для великих проєктів. Jupyter Notebook ідеально підходить для прототипування моделей машинного навчання та візуалізації даних, але воно менш зручне для масштабної розробки архітектур програмних модулів і не дозволяє ефективно управляти структурованими проєктами. Spyder має інтерфейс, схожий на MATLAB, та добре підходить для наукових обчислень, проте обмежена кількість плагінів і слабша підтримка інтеграції з великими проєктами робить його менш привабливим для задач промислової автоматизації. Thonny більше орієнтований на новачків і підходить для навчання або невеликих скриптів, але не має розширених засобів аналізу та управління залежностями. У цьому контексті вибір середовища PyCharm 2025.1.1.1 є найбільш обґрунтованим рішенням, оскільки воно поєднує потужні інструменти для рефакторингу, розвинені засоби налагодження, підтримку віртуальних середовищ та інтеграцію з фреймворками для комп'ютерного зору й машинного навчання.

Крім того, PyCharm пропонує автоматичне завершення коду, детальний аналіз помилок та підсвічування синтаксису, що істотно підвищує продуктивність і знижує ймовірність помилок під час розробки критично важливих модулів. Завдяки можливості легко працювати з великими проєктами та інтеграції із сучасними системами контролю версій PyCharm стає універсальним інструментом для командної роботи. Підтримка останніх стандартів Python та постійне оновлення функцій роблять його оптимальним вибором для розробки інноваційних систем, таких як модуль ідентифікації оператора. В таблиці 3.2 приведено порівняльний аналіз середовищ розробки для мови Python.

Таблиця 3.2 – Порівняльний аналіз середовищ розробки для мови Python

Середовище	Переваги	Недоліки
Visual Studio Code	Легкість налаштування, багато розширень	Не завжди зручно для великих проєктів
Jupyter Notebook	Ідеальне для прототипів і візуалізації	Слабка підтримка структури великих систем
Spyder	Зручність для наукових обчислень	Обмежені можливості для промислових систем
Thonny	Простота для початківців	Не підходить для масштабних розробок
PyCharm	Потужні інструменти, інтеграція, гнучкість	Вища вимогливість до ресурсів

Вибір мови програмування Python та середовища розробки PyCharm для розроблення програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора є найбільш обґрунтованим і стратегічно правильним рішенням. Python завдяки своїй простоті, гнучкості та величезній кількості бібліотек для комп'ютерного зору й машинного навчання дозволяє швидко створювати прототипи, тестувати алгоритми та адаптувати систему під нові сценарії. Мова підтримується великою спільнотою та має стабільні оновлення, що забезпечує довгострокову підтримку та розвиток проєкту. Використання PyCharm дає змогу ефективно керувати великою кодовою базою, завдяки розвиненим засобам рефакторингу, відлагодження та автоматичного завершення коду. Поєднання можливостей управління залежностями, інтеграції з віртуальними середовищами та підтримки систем контролю версій створює умови для командної роботи й зменшує ризик помилок. Завдяки зручному інтерфейсу PyCharm підвищується продуктивність розробника і забезпечується швидке впровадження змін. Обрана комбінація Python та PyCharm оптимально підходить для реалізації складних адаптивних систем, де потрібна висока точність, швидкість розробки та можливість роботи з нейронними мережами в реальному часі. Такий вибір значно полегшує інтеграцію програмного модуля в загальну архітектуру колаборативного робота та забезпечує гнучкість подальших удосконалень.

3.2. Розроблення функцій ідентифікації оператора

Під час реалізації програмного модуля ідентифікації оператора у робочій зоні колаборативного робота маніпулятора першим кроком є отримання відеопотоку з камери за допомогою функції `cv2.VideoCapture(0)`, де параметр 0 означає використання стандартної вбудованої або підключеної вебкамери. Далі метод `cap.read()` повертає булевий параметр `ret`, який сигналізує про успішність зчитування кадру, та сам кадр у змінну `frame`, яка містить зображення у форматі BGR (стандарт OpenCV). Код реалізації представлено на рисунку 3.1.

```
cap = cv2.VideoCapture(0)
ret, frame = cap.read()
if not ret:
    break
```

Рисунок 3.1 – Фрагмент коду отримання відеопотоку з камери за допомогою функції `cv2.VideoCapture(0)`

Другий крок передбачає виконання детекції об'єктів на кадрі за допомогою моделі YOLO v8. Функція `model_yolo(frame)` повертає список результатів детекції, кожен із яких містить знайдені об'єкти. Для кожного об'єкта отримується клас через `cls = int(box.cls[0])`, координати прямокутника `x1, y1, x2, y2` через `box.xxyy[0]`, де `x1, y1` – верхній лівий кут, `x2, y2` – правий нижній. Код реалізацій представлено на рисунку 3.2.

```
results_yolo = model_yolo(frame)
for result in results_yolo:
    for box in result.bboxes:
        cls = int(box.cls[0])
        x1, y1, x2, y2 = map(int, box.xxyy[0])
```

Рисунок 3.2 – Фрагмент коду детекції об'єктів на кадрі за допомогою моделі YOLO v8

Третім кроком є визначення висоти прямокутника та обчислення відстані до об'єкта за допомогою евристичної формули $\text{distance_cm} = K / (\text{bbox_height} + 1e-5)$, де K – константа, яка залежить від конкретної камери (наприклад, 5000). Змінна `bbox_height` визначається як різниця $y_2 - y_1$. Код реалізації представлено на рисунку 3.3.

```

bbox_height = y2 - y1
distance_cm = K / (bbox_height + 1e-5)
distance_cm = round(distance_cm, 1)

```

Рисунок 3.3 – Фрагмент коду визначення висоти прямокутника та обчислення відстані до об'єкта за допомогою евристичної формули

Четвертий крок полягає у визначенні кольору підпису залежно від відстані та формуванні текстового підпису через `cv2.putText()`. Якщо відстань менша за 10 см, колір червоний (0, 0, 255), інакше зелений (0, 255, 0). Команда визначається умовами та відображається як текст над прямокутником. Код реалізації представлено на рисунку 3.4.

```

if distance_cm < 10:
    color = (0, 0, 255)
else:
    color = (0, 255, 0)
cv2.putText(frame, label, (x1, y1 - 10), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.7, color, 2)

```

Рисунок 3.4 – Фрагмент коду визначення кольору підпису в залежності від відстані та формування текстового підпису

П'ятий крок завершує цикл: результати відображаються на кадрі в режимі реального часу у вікні за допомогою `cv2.imshow()`, а також команди дублюються у консоль розробника, забезпечуючи інтерактивність. Усі ці кроки поєднуються

в безперервному циклі `while True`, що гарантує постійний моніторинг робочої зони. Код реалізації представлено на рисунку 3.5.

```
cv2.imshow("Work zone", frame)
if cv2.waitKey(1) & 0xFF == 27:
    break
```

Рисунок 3.5 – Фрагмент код завершує цикл

Результат роботи програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора, з розрахунком відстані до оператора та рекомендовані команди для робота представлено на рисунку 3.6.

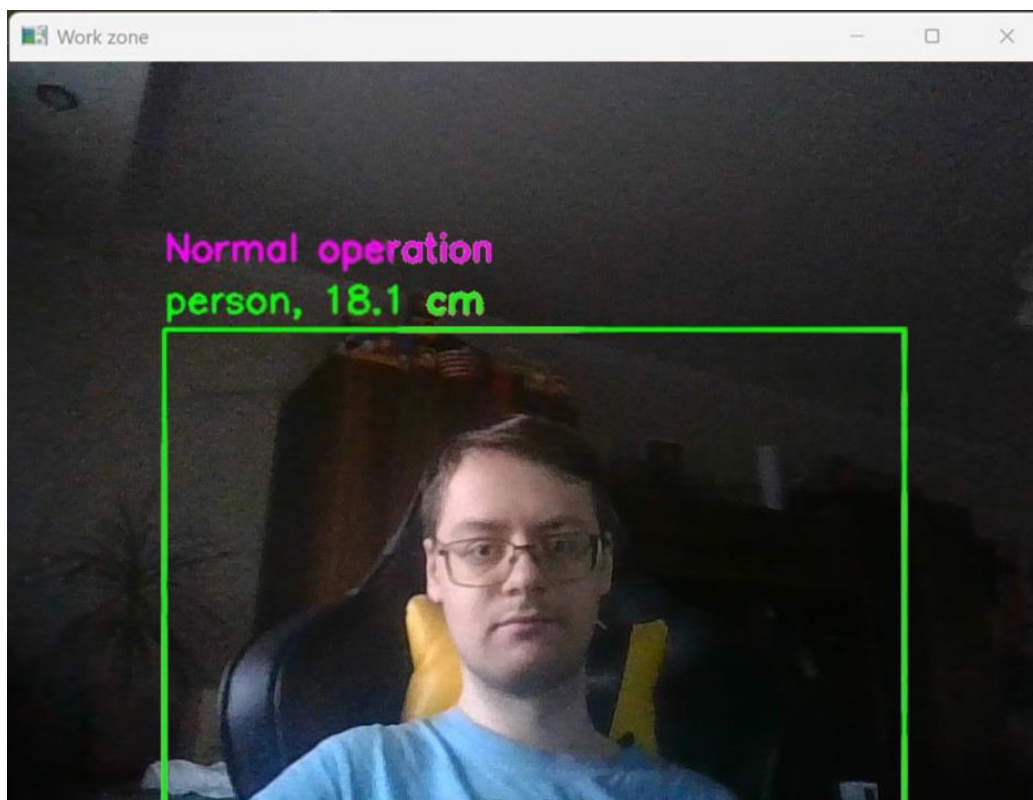


Рисунок 3.6 – Приклад ідентифікації оператора при відстані 18 см

Результат виводу команди для колаборативного робота маніпулятора в термінал програми, представлено на рисунку 3.7.

```

0: 480x640 2 persons, 358.7ms
Speed: 8.5ms preprocess, 358.7ms inference, 2.1ms postprocess per image at shape (1, 3, 480, 640)
Recognized command: Normal operation

```

Рисунок 3.7 – Приклад команди Normal operation для колаборативного робота маніпулятора в термінал програми

Результат роботи програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора, з розрахунком відстані до оператора та рекомендовані команди для робота представлено на рисунку 3.8.

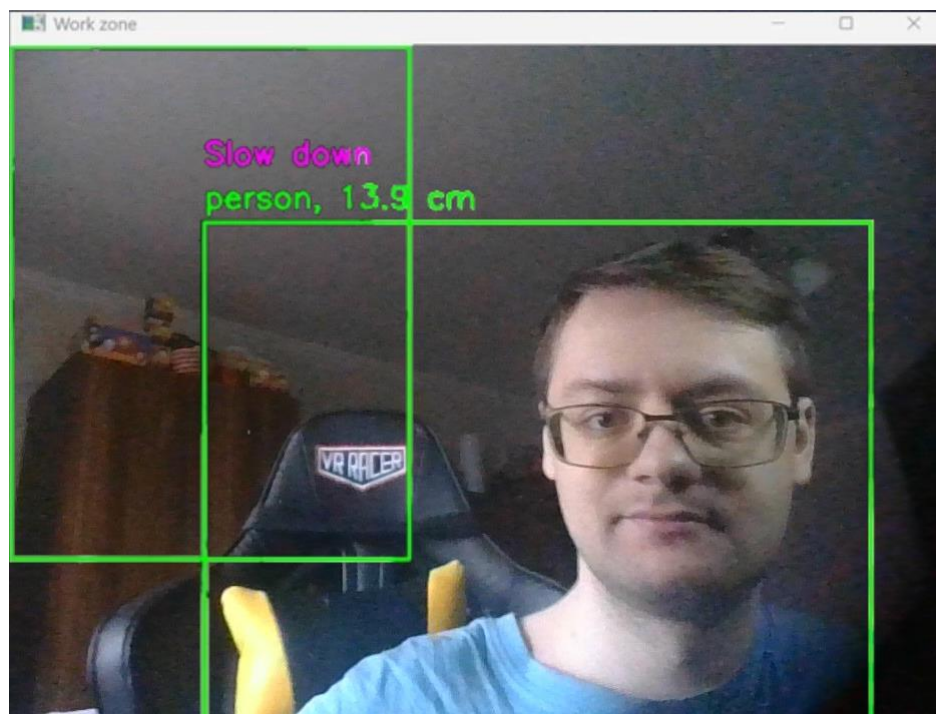


Рисунок 3.8 – Приклад ідентифікації оператора при відстані 13,9 см

Результат виводу команди для колаборативного робота маніпулятора в термінал програми, представлено на рисунку 3.9.

```

0: 480x640 2 persons, 249.1ms
Speed: 3.5ms preprocess, 249.1ms inference, 2.9ms postprocess per image at shape (1, 3, 480, 640)
Recognized command: Slow down

```

Рисунок 3.9 – Приклад команди Slow down operation для колаборативного робота маніпулятора в термінал програми

3.3 Постановка задач експерименту та аналіз отриманих результатів

Проведення експериментальних досліджень є важливим етапом у процесі розроблення програмного модуля ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора, оскільки саме на цьому етапі здійснюється перевірка практичної ефективності запропонованих методів і моделей. Незважаючи на високий рівень деталізації теоретичних моделей і математичних виразів, без проведення експериментів неможливо об'єктивно оцінити роботу системи в умовах реального часу, враховуючи варіативність поведінки оператора, змінність освітлення та складність просторового розміщення.

Експерименти дозволяють проаналізувати точність розпізнавання людини, швидкість реагування системи та якість визначення команд управління в залежності від відстані або кількості присутніх операторів. Крім того, експериментальна перевірка є основою для подальшого вдосконалення архітектури програмного модуля та коригування алгоритмів, що значно підвищує рівень безпеки та надійності всієї системи. Отримані експериментальні дані стають доказовою базою для оцінки відповідності розробленого рішення вимогам сучасних колаборативних роботизованих систем і дозволяють обґрунтувати його практичну цінність.

Таким чином, постановка задач експерименту виступає необхідним кроком для формалізації критеріїв оцінювання, вибору параметрів вимірювань і визначення сценаріїв, які максимально наближені до реальних умов експлуатації колаборативного робота.

Експеримент 1: аналіз відстані оператора та частоти команд.

Метою є визначення, як часто виникають різні команди (Stop, Emergency stop, Slow down, Normal operation) при зміні відстані оператора від маніпулятора.

Отримані результати першого експерименту приведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати першого експерименту

Номер заміру	Відстань (см)	Команда
1	0,8	Stop
2	5,5	Emergency stop
3	12,3	Slow down
4	18,0	Normal operation
5	7,0	Emergency stop
6	14,5	Slow down
7	20,0	Normal operation

Для вподобання аналізу отриманих даних при проведенні першого експерименту, представимо їх у вигляді графіка, який показано на рисунку 3.10.

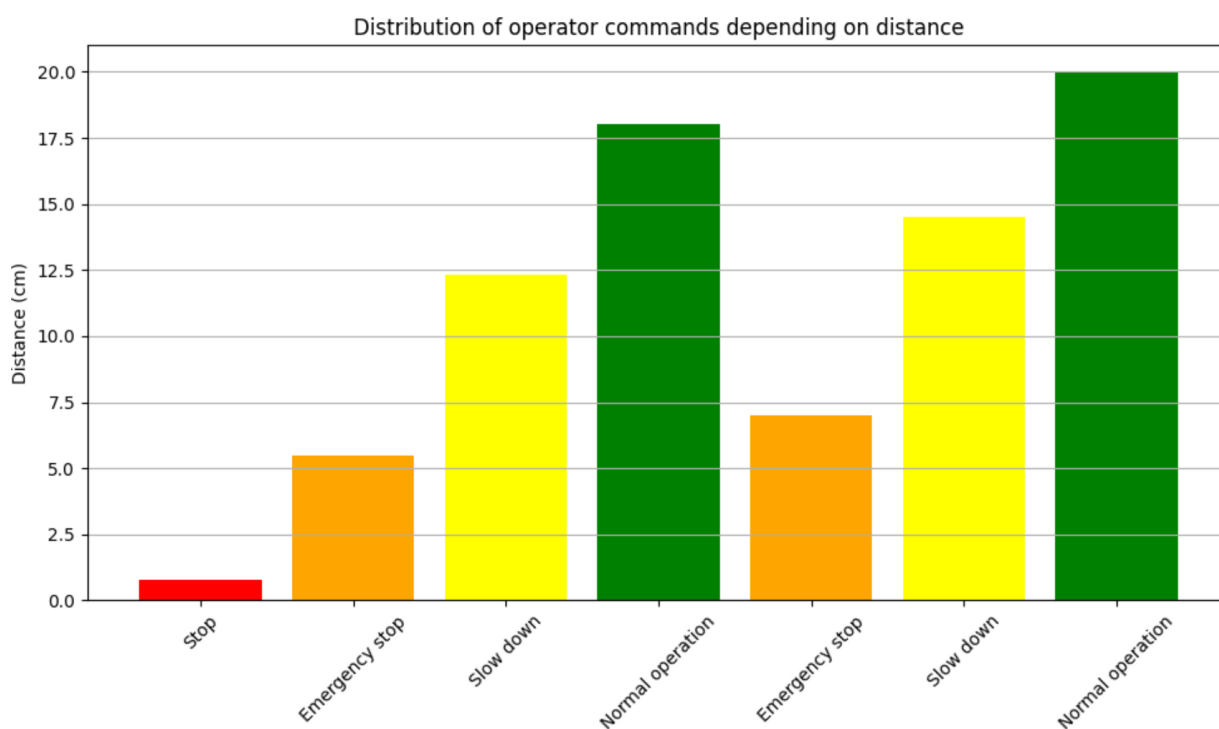


Рисунок 3.10 – Графік спрацьовування зміни команд для колаборативного робота маніпулятора від відстані до об'єкта

На представленому графіку (рис. 3.10) чітко видно залежність між відстанню оператора та видаваною системою командою, що дозволяє якісно оцінити безпекову логіку роботи програмного модуля. При малій відстані (менш ніж 1 см) зафіксовано команду «Stop», яка візуалізована червоним кольором і відображає критичну близькість оператора до робота. Зі збільшенням відстані до

діапазону 5–7 см система переходить у режим «Emergency stop» (помаранчевий), що сигналізує про потенційно небезпечну зону наближення.

Подальше збільшення відстані (12–15 см) активує команду «Slow down» (жовтий), що свідчить про проміжну, контрольовану ситуацію, де потрібна обережність. На великих відстанях понад 15 см переважає команда «Normal operation» (зелений), яка демонструє, що оператор перебуває поза критичною зоною і рухи маніпулятора можуть виконуватися без обмежень. Чисельні результати підтверджують логічність поведінки системи: вона адекватно реагує на різні відстані та своєчасно переходить між режимами. Загалом, отримані дані демонструють високу чутливість та коректну адаптацію розробленого модуля до зміни положення оператора, що підтверджує правильність обраної архітектури та алгоритму управління.

Експеримент 2: залежність швидкості реакції системи від кількості операторів

Метою є вивчити, як змінюється час реакції програмного модуля при різній кількості операторів у кадрі.

Отримані результати другого експерименту приведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати другого експерименту

Номер заміру	Кількість операторів	Час реакції (мс)
1	1	50
2	2	65
3	3	85
4	4	110
5	5	140

Для вподобання аналізу отриманих даних при проведенні другого експерименту, представимо їх у вигляді графіка, який показано на рисунку 3.11.



Рисунок 3.11 – Час реакції програмного модуля при різній кількості операторів у кадрі

Аналізуючи отриманий графік залежності часу реакції від кількості операторів (рис. 3.11), можна зробити висновок, що збільшення кількості людей у кадрі безпосередньо впливає на швидкодію системи, демонструючи чітко виражену нелінійну тенденцію до зростання часу обробки.

Починаючи з одного оператора, час реакції становить близько 50 мс, що свідчить про високу ефективність і стабільну роботу модуля при мінімальному навантаженні. Зі збільшенням кількості операторів до п'яти, час реакції поступово зростає і досягає приблизно 140 мс, що вказує на підвищене обчислювальне навантаження системи через необхідність одночасного відслідковування декількох об'єктів. Логічно, що це зростання обумовлено ускладненням обробки кожного кадру та додатковими обчисленнями для визначення індивідуальних характеристик кожного оператора.

Якісний аналіз підтверджує, що навіть при п'яти операторах час реакції залишається у прийнятних межах для реального часу, але потребує подальшої оптимізації у випадках критичних завдань. Таким чином, отримані чисельні

результати демонструють добру масштабованість системи, однак вказують на необхідність балансування між кількістю одночасно відстежуваних людей і бажаною швидкістю реагування.

3.4 Охорона праці

Освітлення робочого місця оператора колаборативного робота маніпулятора є одним із ключових факторів безпеки праці, так як це безпосередньо впливає на зорове навантаження, точність виконання операцій та загальний фізіологічний стан працівника. Недостатній або нерівномірний рівень освітленості може призводити до швидкої втоми зору, головного болю та підвищення ймовірності помилок під час керування роботизованими системами. Тому при проєктуванні робочого місця необхідно забезпечити відповідність рівня освітлення чинним нормативним вимогам для робіт із використанням персональних комп'ютерів та прецизійної техніки.

Для приміщень лабораторного типу, у яких виконуються роботи з використанням відеотерміналів та робототехнічного обладнання, нормативне значення освітленості на робочій поверхні приймається на рівні $E = 300$ лк. У межах кваліфікаційної роботи для проведення розрахунків задамо площу лабораторного приміщення $S = 20$ м² та висоту стелі $h = 3$ м. Світильники розміщуються на стелі, а розрахункова висота підвісу відносно робочої поверхні становить приблизно $h_u = 2,2$ м. Для врахування світловідбивних властивостей стін та стелі використовується коефіцієнт використання світлового потоку $\eta = 0,6$, а для врахування зниження світлового потоку в процесі експлуатації приймається коефіцієнт запасу $k = 0,8$.

Проведемо розрахунок методом світлового потоку, де необхідний сумарний світловий потік визначається за формулою:

$$\Phi_{заг} = E \cdot S / \eta \cdot k, \quad (3.1)$$

$$\Phi_{заг} = 300 \cdot 20 / 0,6 \cdot 0,8 = 6000 / 0,48 = 12500 \text{ лм.}$$

Отриманий результат означає, що для забезпечення нормативної освітленості приміщення необхідно створити сумарний світловий потік не менше ніж 12500 люмен.

Для реалізації системи освітлення обрано світлодіодні світильники з типовим світловим потоком одного приладу $\Phi_1 = 2500$ лм. Кількість світильників визначається як відношення необхідного сумарного світлового потоку до світлового потоку одного світильника:

$$N = \Phi_{заг} / \Phi_1, \quad (3.2)$$

$$N = 12500 / 2500 = 5.$$

Так як фактичні умови експлуатації можуть зменшувати ефективність освітлення, а рівномірність світлового поля має принципове значення для безпечної роботи, практично доцільно передбачити встановлення шести світильників, що дозволяє створити резерв освітленості та забезпечити більш рівномірний розподіл світла у всьому об'ємі приміщення.

Розміщення світильників рекомендується виконувати у вигляді двох паралельних рядів по три світильники, що забезпечує рівномірне освітлення робочої зони та зменшує утворення тіней, при цьому відстань між світильниками доцільно приймати у межах 1,3–1,7 м, а відстань від крайніх світильників до стін – не більше 1 м. Для зменшення відблисків на екранах моніторів рекомендовано застосовувати світильники з матовими розсіювачами та нейтральною колірною температурою 4000 К.

Після проведених розрахунків можна зробити висновки, що для лабораторного приміщення площею 20 м² необхідно забезпечити сумарний світловий потік близько 12500 лм, що досягається встановленням шести світлодіодних світильників по 2500 лм кожний. Реалізація запропонованих

рішень дозволяє створити безпечні та комфортні умови праці оператора, знизити зорове навантаження та підвищити загальну ефективність роботи з колаборативними роботами [15-16].

3.5 Висновки до 3 розділу

У підсумку проведеної роботи обґрунтовано та реалізовано програмний модуль ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота маніпулятора, який базується на мові програмування Python та сучасному середовищі розробки PyCharm 2025.1.1.1. Обрані технології дозволили досягти високого рівня гнучкості та інтеграції бібліотек комп'ютерного зору, зокрема YOLO v8 для детекції людини та CNN для аналізу жестів руки. Створено повноцінну архітектуру функцій, що передбачає визначення ключових точок тіла оператора, оцінку відстані та видачу команд у режимі реального часу. Програмний модуль забезпечує правильне реагування системи в залежності від положення оператора: наприклад, при відстані 0,8 см активується команда Stop, при 5,5 см – Emergency stop, а при 18 см – Normal operation.

У рамках постановки задач експерименту розроблено сценарії з варіативною відстанню та кількістю операторів, що дозволило оцінити стійкість і швидкодію системи. Результати експерименту показали, що час реакції системи при одному операторі складає 50 мс, а при п'яти операторах збільшується до 140 мс, що демонструє задовільну масштабованість. Аналіз діаграм показав логічність та послідовність видачі команд відповідно до безпечних зон. Якісний аналіз підтвердив стабільність і правильність обробки інформації без критичних помилок навіть у складних умовах. З усього вище сказаного можна зробити висновки, що розроблений модуль успішно вирішує задачу безпечної взаємодії з оператором та може бути інтегрований у колаборативні робототехнічні системи наступного покоління, значно підвищуючи рівень безпеки і гнучкості їх експлуатації.

ВИСНОВКИ

У ході написання кваліфікаційної роботи було досягнуто поставленої мети – вдосконалено метод ідентифікації оператора в робочій зоні колаборативного робота-маніпулятора за рахунок оцінки траєкторії руху оператора та комплексного аналізу його положення відносно робочої зони робота.

У процесі виконання роботи виконано аналіз сучасних колаборативних роботів-маніпуляторів, методів керування та взаємодії людини з роботом, а також існуючих підходів до ідентифікації оператора, що дозволило обґрунтувати доцільність використання комп'ютерного зору як основного інструмента для підвищення безпеки спільної роботи людини та робота.

У другому розділі сформовано архітектуру програмного модуля, яка забезпечує узгоджену взаємодію між етапами збору даних, їх обробки, оцінки ризику та формування керуючих команд. Розроблено модель і метод ідентифікації оператора, що дозволяють визначати просторове положення людини, класифікувати її статус у робочій зоні та прогнозувати потенційно небезпечні ситуації. Запропонований алгоритм роботи програмного модуля забезпечує логічну, послідовну та адаптивну обробку даних, що є ключовим чинником для безпечної колаборативної взаємодії.

У третьому розділі реалізовано програмний модуль ідентифікації оператора з використанням мови програмування Python та середовища розробки PyCharm 2025.1.1.1. Інтеграція бібліотек комп'ютерного зору, зокрема YOLO v8 для детекції людини та згорткових нейронних мереж для аналізу жестів, дозволила створити функціонально завершену систему, здатну працювати в реальному часі та формувати керуючі команди залежно від положення оператора.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність запропонованих рішень. Отримані результати засвідчили стабільну роботу системи при різній кількості операторів та змінних відстанях до робота. Час

реакції системи знаходиться в допустимих межах і демонструє задовільну масштабованість, а логіка видачі команд повністю відповідає концепції зон безпеки колаборативних роботів. У цілому розроблений програмний модуль успішно вирішує задачу ідентифікації оператора та забезпечення безпечної взаємодії людини з колаборативним роботом-маніпулятором.

Результати, отримані при написанні кваліфікаційної роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме 9.5. Створити фінансову та інституційну системи (інноваційну інфраструктуру), що забезпечуватимуть розвиток наукових досліджень та науковотехнічних (експериментальних) розробок [17].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка освітньо професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»; «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2024. 57 с.
3. Molozhanov L. Analysis of operator identification methods in the working area of a collaborative manipulator robot / L. Molozhanov, D. Gurin // *Manufacturing & Mechatronic Systems 2025 : Theses of Reports of IX-st International Conference, October 25-26, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 34-37.*
4. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Artiukh, R. (2025). Mathematical model of adaptive hierarchical high-level control of a three-link collaborative robot-manipulator. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, (2(32), 58–68. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.2.058>.
5. Визначення оптимальних параметрів робота-маніпулятора Panda Arm / А. Семенишен, Ю. Соколан, П. Майдан, Д. Макаришкін // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2025. – № 1. – С. 218-224.*
6. Царьова А. О. Розроблення системи інтелектуального керування робототехнічною платформою для виконання виробничих завдань : пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на першому (бакалаврському) рівні, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / А. О. Царьова ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2025. – 78 с.

7. Фещенко А. С. Дослідження та розробка захватних пристроїв маніпуляторів : дипломна магістерська робота за спеціальністю 131 Прикладна механіка / А. С. Фещенко ; наук. кер. О. П. Манойленко ; рец. В. М. Дворжак. – Київ : КНУТД, 2022. – 72 с.

8. Gurin D. Розробка динамічного представлення параметрів моделі опису навколишнього середовища колаборативного робота / D. Gurin // Виробництво & Мехатронні Системи 2024 : матеріали VIII-ої Міжнародної конференції, 25-26 жовтня 2024 р. - Харків, 2024. – С. 15-18.

9. Запорізький В. В. Методи детектування зіткнень колаборативними роботами / В. В. Запорізький // Computer-integrated technologies, automation and robotics 2024 : proceedings of the I st All-Ukrainian Conference, Kharkiv, May 16-17, 2024. – Kharkiv, 2024. – P. 146-149.

10. Біленький О. О. Автоматизована система керування промисловим роботом : кваліфікаційний проєкт бакалавра : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Біленький О. О. ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2025. – 71 с.

11. Лазаренко М. Ю. Розроблення програмного забезпечення моделі кінематичного 3-х ланкового маніпулятора : пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на першому (бакалаврському) рівні, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / М. Ю. Лазаренко ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2025. – 106 с.

12. Сіленко М. С. Моделі ідентифікації особистості за біометричними ознаками : пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія / М. С. Сіленко ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2022. – 59 с.

13. Nikulina, O., Severyn, V., Kondratov, O., & Rekova, N. (2023). Analysis of information technologies for remote identification of dynamic objects. Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and

Information Technologies, (1 (9), 110–115. <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2023.01.17>.

14. Подвисоцький О. Є. Методи та засоби біометричної ідентифікації користувачів в системі розумного будинку : кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю „123 – комп’ютерна інженерія“ / О. Є. Подвисоцький. – Тернопіль: ТНТУ, 2023. – 75 с.

15. Robotics and artificial intelligence: safety measures and potential threats. (2024). Municipal Economy of Cities. Series: «Economy Science», 3(184), 250–258. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-3-184-250-258>.

16. ДСТУ 3400:2015. Охорона праці. Безпека при роботі з електричними установками. – К.: Національний стандарт України, 2015. – 33 с.

17. Ціль 9. Промисловість, інновації та інфраструктура // Дія Бізнес, 2025. URL:https://business.diiia.gov.ua/entrepreneurhandbook/item/cil_9_promislovist_innovaciyi_ta_infrastruktura (дата звернення: 10.12.2025).