

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 перший (бакалаврський)  
Розроблення системи автоматизації для визначення оптимальної  
траєкторії руху за допомогою комп'ютерного зору  
роботизованої мобільної платформи на виробництві  
(тема)

Виконав:  
здобувач 4 року навчання,  
групи АКТАКІТ-21-2  
Артем ОГАРЬ  
(власне ім'я прізвище)

Спеціальності 151 Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології  
(повна назва освітньої автоматизованої системи)

Керівник доцент Рауф АЛЛАХВЕРАНОВ  
(посада, ім'я прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАР

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ  
(власне ім'я прізвище)

2025 р.

Я, Огарь Артем Анатолійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію та 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.

«23» червня 2025 р.

\_\_\_\_\_

Артем ОГАРЬ

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки  
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
Тип автоматизованої систем освітньо-професійна  
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_

(підпис)

« 28 » квітня 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Огарь Артему Анатолійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматизації для визначення оптимальної траєкторії руху за допомогою комп'ютерного зору роботизованої мобільної платформи на виробництві

затверджена наказом по університету від “ 19 ” травня 2025р. № 390 Ст.

2. Термін подання студентом роботи “ 25 ” червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Роботизована мобільна платформа;

3.2 Програмний продукт мовою JAVA;

3.3 Реалізація зчитування перешкод;

3.4 Реалізація алгоритму розвідки в незнайомих умовах;

3.5 Реалізація картографування та планування дій;

3.6 Реалізація прийняття рішень роботом на основі оптимізованого алгоритму A\*.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ;

4.2 Аналіз технічного завдання та предметної області;

4.3 Алгоритми пошуку шляху;

4.4 Імітаційне моделювання поведінки об'єкта керування;

4.5 Заходи і розрахунки для забезпечення безпечних умов праці;

4.6 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) – 16 с. формату А4

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	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання та предметної області	28.04 – 04.05.25	виконано
2	Алгоритм пошуку оптимального шляху	05.05 – 14.05.25	виконано
3	Імітаційне моделювання поведінки об'єкта керування	15.05 – 28.05.25	виконано
4	Заходи і розрахунки для забезпечення безпечних умов праці	29.05 – 11.06.25	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	12.06 – 15.06.25	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-системою StrikePlagiarism	16.06 – 18.06.25	виконано
7	Подання роботи на рецензію	19.06 – 21.06.25	виконано
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	22.06 – 24.06.25	виконано
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	25.06.25	виконано

Дата видачі завдання 28.04.2025 р.

Студент \_\_\_\_\_ Артем ОГАРЬ  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доцент Рауф АЛЛАХВЕРАНОВ  
(підпис) (посада, ім'я прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 55 с., 3 табл., 22 рис., 1 дод., 16 джерел.

МОБІЛЬНА РОБОТИЗОВАНА ПЛАТФОРМА, АЛГОРИТМ, ТРАЄКТОРІЯ РУХУ, СИСТЕМА КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ, НАВІГАЦІЙНА СИСТЕМА, ОПТИМІЗАЦІЯ, КЕРУВАННЯ, ПЕРЕШКОДА.

Метою роботи – розробка алгоритмів для визначення оптимальної траєкторії руху мобільних роботизованих платформ на виробництві, за рахунок використання інформації від системи комп'ютерного зору.

Об'єкт розробки – навігаційна система мобільної роботизованої платформи.

Предмет розробки – алгоритм руху мобільної роботизованої платформи, з необхідністю коригувати рух для об'їзду перешкод, в умовах відсутності інформації про навколишні об'єкти.

У кваліфікаційній роботі були досліджені різні системи навігації мобільних роботизованих платформ та алгоритми подолання перешкод, реалізовано два різних алгоритми керування: розвідувальний, при невідомих перешкодах, та оптимізований A\*, що опирається на розвідані дані.

На базі проведеного дослідження, мовою програмування JAVA розроблено програмний продукт для керування мобільною роботизованою платформою.

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

## ABSTRACT

Explanatory note: 55 pp., 3 tab., 22 figs., 1 appendices, 16 sources.

MOBILE ROBOTIC PLATFORM, ALGORITHM, TRAJECTORY, COMPUTER VISION SYSTEM, NAVIGATION SYSTEM, OPTIMIZATION, CONTROL, OBSTACLE.

The purpose of the work is to develop algorithms for determining the optimal trajectory of mobile robotic platforms in production, using information from a computer vision system.

The object of development is the navigation system of a mobile robotic platform.

The subject of development is the algorithm for the movement of a mobile robotic platform, with the need to adjust the movement to avoid obstacles, in the absence of information about the surrounding objects.

In the qualification work, various navigation systems for mobile robotic platforms and obstacle overcoming algorithms were investigated, and two different control algorithms were implemented: an exploratory one for unknown obstacles and an optimized A\* one based on the intelligence data.

Based on the study, a software product for controlling a mobile robotic platform was developed in the JAVA programming language.

The results of this work can be attributed to the Sustainable Development Goal 9 “Industry, Innovation and Infrastructure”, in particular to the paragraph 9.4 “Development of High-Tech Engineering”.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	9
Вступ .....	10
1 Аналіз технічного завдання та предметної області .....	13
1.1 Система керування роботизованою мобільною платформою .....	13
1.2 Визначення положення роботизованої мобільної платформи у зовнішньому середовищі .....	17
1.3 Методи визначення траєкторії руху роботизованої мобільної платформи .....	19
2 Алгоритм пошуку оптимального шляху .....	23
2.1 Загальна інформація про алгоритми пошуку оптимального шляху ...	23
2.2 Використання евристичної функції в алгоритмах пошуку .....	25
2.3 Порівняння алгоритмів пошуку оптимального шляху .....	26
2.4 Обґрунтування вибору алгоритму та суть оптимізації .....	35
3 Імітаційне моделювання поведінки об'єкта керування .....	37
3.1 Огляд можливостей автоматизованої системи .....	37
3.2 Аналіз результатів оптимізованого алгоритму A* .....	44
4 Заходи і розрахунки для забезпечення безпечних умов праці .....	47
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці .....	47
4.2 Промислова безпека на робочому місці .....	47
4.3 Виробнича санітарія у приміщенні .....	48
4.4 Пожежна безпека виробничого приміщення.....	50
Висновки .....	52
Перелік джерел посилання .....	54

Додаток А Код реалізації оптимізованого алгоритму А* .....	64
Додаток Б Демонстраційний матеріал .....	65

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БД – база даних;

КПО – коефіцієнт природної освітленості;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПК – персональний комп'ютер;

РМП – роботизована мобільна платформа;

СКС – стохастична контекстно-вільна граMATика;

ЦП – центральна пам'ять;

## ВСТУП

Серед доступних мобільних роботів більшість мають апаратний та програмний рівень прошивки. Обладнання доповнюється датчиками та приводами. За допомогою датчиків вимірюють різні значення показань у навколишньому середовищі, зокрема, світло, тепло, а також перетворюють їх на цифрову інформацію. У свою чергу приводами є двигуни, які викликають фізичні дії. Оскільки програмний рівень приймає інформацію з датчиків на вхід, то генерування команди приводу робота відбувається таким чином, щоб робот виконував поставлене йому завдання. Таке відокремлення апаратної складової від програмного забезпечення для прийняття рішень має суттєві переваги, зокрема дозволяє виробникам створювати стандартизованих роботів без конкретних додатків, а користувачам – гнучко реалізовувати індивідуальні алгоритми прийняття рішень на основі додатків.

Прийняття рішень складається з декількох підрозділів: планування, обґрунтування та машинне навчання. Планування відповідає за майбутні дії для досягнення поставленої мети. Обґрунтування визначає істинність тверджень з відомих фактів. Навчання базується на використанні минулого досвіду для покращення прийняття рішень. Застосування штучного інтелекту у робототехніці приводить до покращення продуктивності робота з досвідом його роботи.

У процесі розвитку таких напрямків науки як теорія автоматичного керування та штучний інтелект сучасний робот навчився не тільки виконувати програму, яку закладено у нього, але й на основі інформації, що отримується за допомогою різноманітних датчиків і суміжних систем, приймати рішення самостійно, а також до мінімуму зводити помилки під час виконання поставлених йому завдань.

Однією з найбільш важких наразі є задача щодо автоматизації керування траєкторією руху робота за умови наявності перешкод. Найбільш важливими чинниками у даній ситуації є забезпечення робота необхідними датчиками або підсистемами, за допомогою яких можна визначити наявність, тип та відстань до перешкоди, а також формування точних і своєчасних дій щодо зміни траєкторії руху та прийняття подальших рухових рішень.

Мета роботи полягає в розробке алгоритмів для забезпечення автономного руху мобільних роботів, за рахунок використання інформації від системи комп'ютерного зору.

Об'єктом розробки є навігаційна система автономного мобільного робота.

Предметом розробки виступає алгоритм руху робота з необхідністю коригування руху для об'їзду перешкод за умов відсутності інформації про навколишні об'єкти.

Для досягнення вищезазначеної мети необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати наявні методи та алгоритми для забезпечення автономного руху мобільних роботів, а також методи оцінки зовнішнього середовища на основі використання інформації від системи комп'ютерного зору;

- провести дослідження чинників, які впливають на побудову системи керування і позиціонування, що в подальшому забезпечують реалізацію руху робота з уникненням перешкод;

- розробка алгоритму керування роботом на основі системи прийняття рішень, проведення необхідних розрахунків, вимірювань і адаптація обраного алгоритму керування;

- розробка алгоритму картографування за умови неповної інформації щодо оточуючих об'єктів;

- реалізація алгоритму пошуку шляху  $A^*$ , модифікація алгоритму;

- аналіз реалізації розробленого алгоритму  $A^*$ ;

- питання охорони праці.

Пояснювальну записку кваліфікаційної роботи оформлено згідно з ДСТУ 3008:2015 [1], а також з рекомендаціями щодо підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти [2-3].

Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

# 1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

## 1.1 Система керування роботизованою мобільною платформою

Області застосування РМП мають широкий спектр починаючи з побутового призначення та закінчуючи промисловим (майже кожне виробництво використовує РМП). Сьогодні активно використовують різноманітні програмні засоби для керування РМП, а при їх виростанні на виробництві використовують жорсткі алгоритми для керування.

Основні задачі, які вирішуються при створенні РМП відносяться:

- керування і оцінка положення РМП;
- оцінка геометрії місцевості і властивостей поверхні;
- комп'ютерний зір.

За ступенем незалежності від участі людини-оператора в контурі керування всі РМП можуть бути класифіковані на дві великі групи:

- з автоматичним керуванням;
- з інтерактивним керуванням.

РМП з автоматичним керуванням здійснюється системою керування без участі людини.

Для того щоб здійснювати дії без участі людини (зазвичай в недетермінованої, мінливому середовищі) РМП повинні володіти штучним інтелектом. У зв'язку з цим, на відміну від інших роботів, РМП з автоматичним керуванням в джерелах інформації зазвичай називаються автономними.

Автономні РМП здатні самі (в залежності від сигналів від датчиків) приймати рішення в мінливих обстановці. Іноді вони називаються також самонавчальними РМП.

РМП з інтерактивним керуванням мають можливості людського розуму на рівні прийняття рішення в критичних ситуаціях, тому вони перевершують в даний час найрозвиненіші системи штучного інтелекту.

Внаслідок автономні РМП є менш розвиненими ніж системи більш високого інтелектуального рівня [5].

РМП з інтерактивним керуванням можуть працювати, і в автоматичному режимі, і управлятися людиною-оператором. На відміну від біотехнічних систем (систем з ручним керуванням), інтерактивні системи мають пристрої пам'яті для автоматичного виконання певних дій.

Здійснюється керування РМП людиною-оператором на рівні рухів. Це потребує від людини безперервне слідкування за діями РМП, а також швидке та оперативне керування його наступними діями. Такий підхід має ряд недоліків, як висновок існує визначення нездатності платформи приймати самостійні рішення. До них можна віднести необхідність постійного каналу зв'язку з людиною (кабельний зв'язок або радіозв'язок), істотно обмежена сфера застосування робота.

Радіозв'язок забезпечує високу рухливість платформи і великий радіус дії, проте має декілька недоліків:

- невисока перешкодозахищеність;
- неможливість зберігати режим радіомовчання;
- припинення зв'язку в зонах відсутності сигналу.

Кабельна лінія зв'язку надійна, забезпечує скритність передачі сигналів, захищена від перешкод, але обмежує рухливість і значно зменшує радіус дії РМП. Людина-оператор, при виконанні технологічних операцій, використовує інформацію про об'єкт та процес виконання робіт виведену на екрани моніторів, яка була отримана з камер, безперервно управляє в режимі ручного керування виконавчими механізмами транспортного засобу та маніпулятора. Хід виконання вибухотехнічних робіт є складним процесом керування із-за збільшення ймовірності помилкових дій. Так як він призводить до швидкої

стомлюваності людини-оператора, тому вимагає підвищену увагу та обережність. Крім того, людина не завжди може адекватно оцінити обстановку за даними і здійснити правильне керування. Зазначених недоліків можна уникнути, якщо керування з боку людини-оператора буде проводитися рівні постановки мети, а не на рівні рухів. Такий підхід вимагає від РМП самостійного прийняття рішення для виконання конкретних дій, в зв'язку з чим виникає проблема отримання і використання знань, що лежать в основі системи прийняття такого рішення.

Одним з ефективних варіантів формування бази знань для РМП є його навчання на основі дій людини-оператора [6].

Система керування (СК) отримує інформацію про зовнішній світ і про внутрішні параметри платформи від сенсорної системи, як компоненти якої можуть виступати різноманітні датчики, комп'ютерний зір тощо.

Обробивши цю інформацію, вона формує керуючі команди для виконавчої системи, в якості якої виступають засоби руху і маніпулятори, а також різноманітне обладнання. В процесі роботи інтелектуальна система керування приймає рішення про керування з метою виконання поставленого завдання. При цьому вона використовує інформацію, що зберігається в базах даних і знань РМП. Залежно від рівня «інтелектуальності» платформи, ці бази можуть мати різну структуру і зберігати різну інформацію. В якості такої може виступати, наприклад, інформація про ситуації, що виникають в процесі його руху. Це характерно для систем, побудованих за принципом «ситуаційного керування». Або, наприклад, якщо СК побудована за принципом нечіткого логічного висновку, то бази даних можуть містити інформацію про продукційних правилах і параметрах вхідних і вихідних змінних.

Головним об'єктом цієї схеми є людина-оператор. Він може або безпосередньо управляти рухом платформи, або формулювати мету, яку РМП повинен виконати самостійно або за мінімальної участі людини. Другий випадок, зазвичай, належить до завдань екстремальної робототехніки, про які

згадувалося раніше, коли участь людини в процесі керування платформою важко або неможливо, наприклад при роботі в небезпечних умовах.

Метою участі оператора в процесі керування на рівні рухів може бути навчальна робота, як наприклад в розглянутому завданні керування конфігурацією шасі. При цьому оператор вручну управляє кутами траків при русі платформи по рельєфу, схожим з тим, в якому доведеться йому працювати.

Інформація від сенсорної системи і інформація про керування використовується для навчання. Надалі «навчений» РМП зможе самостійно здійснювати керування траками при русі [6].

Таким чином в ході проведеного аналізу видів управління РМП можна скласти узагальнену схему, яка відобразить взаємодію між платформою, зовнішнього середовища, системи сенсibilізації (рис. 1.1).

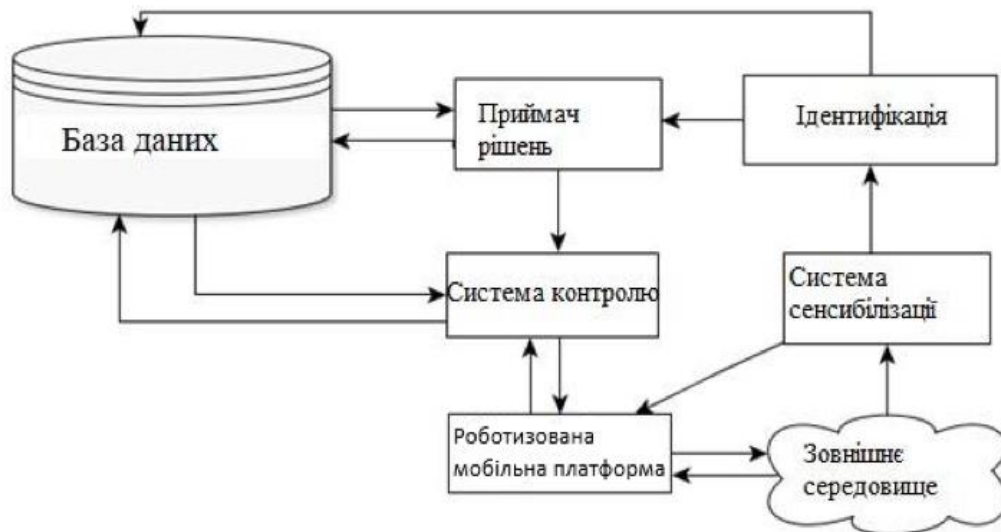


Рисунок 1.1– Схема взаємодії РМП з зовнішнім середовищем

РМП здобуває інформацію з зовнішнього середовища за допомогою системи сенсibilізації, у яку входять: сенсори, звукові приймачі, відеокамери і тощо. Система ідентифікує сигнали та передає їх у систему контролю РМП, яка у свою чергу зв'язується з базою даних (БД) та розробляє план наступних дій. БД може бути скорегована людиною-оператором, таким чином відбувається керування РМП.

Вході проведення аналізу типів керування РМП можна зробити висновок, що при управлінні необхідно здійснювати взаємозв'язок між оператором-людиною та платформою для видачі завдання на його переміщення незалежно від типу його керування, що підтверджує актуальність мети роботи.

## 1.2 Визначення положення роботизованої мобільної платформи у зовнішньому середовищі

Первинним завданням при формуванні траєкторії руху РМП є завдання визначення поточного положення, в якій він знаходиться. Для цього, платформа має включати програмну частину. Для керування РМП необхідно вирішувати наступні завдання:

- планування траєкторій руху;
- для виконання руху по сформованим траєкторіях, необхідно виробити задані впливи на виконавчі механізми платформи.

На рисунку 1.2 представлена схема СК.

Блок первинної обробки даних отримує необроблену інформацію з датчиків про стан зовнішнього середовища. У цьому блоці дані збираються, групуються і піддаються обробці. На виході виходять відформатовані дані, що передаються по стандартних протоколах. Це необхідно для зручності підключення нових датчиків, і чіткої систематизації даних, що в подальшому полегшує роботу з даними.

Інформаційно-вимірвальна система ідентифікації ситуації на основі оброблених даних вибудовує картину навколишнього світу. Дані з датчиків перетворюються в набір параметрів, на основі яких інші підсистеми приймають рішення. Параметри формуються за допомогою бази знань і алгоритмів, проводиться розпізнавання навколишніх об'єктів і побудова сенсорної карти середовища.

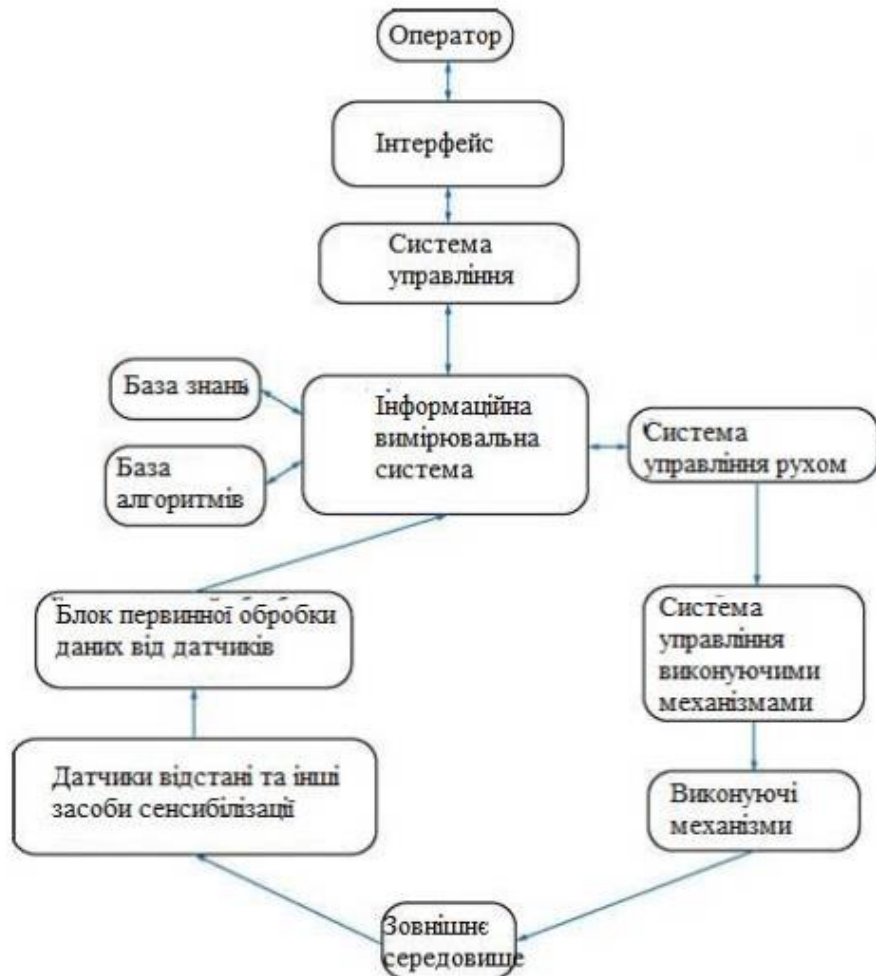


Рисунок 1.2 – Структурна схема системи керування РМП для визначення траєкторії руху

У базі алгоритмів містяться алгоритми для побудови на основі даних сенсорної карти, розпізнавання навколишнього оточення і предметів (розпізнавання звукових образів і зображень, цифрова обробка сигналів), обчислення необхідних параметрів, і перевірка отриманих даних. База знань являє інформацію про зовнішнє середовище, закладену на етапі навчання і придбану в процесі функціонування. Знання упорядковуються і оновлюються.

Формування значень швидкості руху з огляду на динамічні властивості РМП, для здійснення поставлених цілей є основним завданням системи керування рухом. Зв'язок з оператором здійснюється через інтерфейс.

Завдання інтерфейсу полягає у контролюванні функціонування РМП і здійснення спостереження за процесом виконання поставлених цілей. Блок

первинної обробки робить обробку і аналіз зображень, що надходять від оптико-електронних систем [7].

Завдання навігації включає у себе визначення положення РМП в робочому просторі – локалізацію і складання уявлення, описи навколишнього світу – картографію.

Інформація про поточний стан РМП необхідна для вирішення більшості завдань керування:

- проходження заданої траєкторії;
- пошуку шляху в задану точку;
- повернення в вихідне положення.

Інформація про навколишній світ, яка найчастіше представляється у вигляді карти або плану місцевості, необхідна для запам'ятовування пройденого маршруту, планування траєкторії в обхід перешкод, стеження за динамічними об'єктами [7].

### 1.3 Методи визначення траєкторії руху роботизованої мобільної платформи

Метою планування шляху є обчислення вільної перешкоди маршруту від вихідного положення до кінцевої позиції при мінімізації певного критерію. Зазвичай використовується найменша відстань для розрахунку маршруту. Можна використати багато різних підходів для вирішення цієї проблеми, моделюючи середовище робота та застосування евристичного пошуку. Метод конфігураційного простору, представлення графіка видимості, діаграма Вороного та клітинне розкладання є методами моделювання середовища [8].

Жоден з цих методів не враховує фізичних обмежень платформи дотримуватися запланованого маршруту. Однак ці обмеження мають значний вплив на здатність дотримуватись цього маршруту. Крива суцільної кривизни може бути встановлена на обчислений маршрут для вирішення цієї проблеми.

Шлях отримують методом відбору проб підігнати криві в потік позицій РМП. Цей процес є так званий шлях генерування, він використовує запланований маршрут як запис [7]. Акцент процесу генерації шляху знаходиться в геометричній формівластивості шляху, щоб уникнути розривів у управлінні РМП.

Послідовно-криволінійні шляхи забезпечують хороші умови для слідування автономним транспортним засобам певної траєкторії [7].

Існує кілька методів які забезпечують незмінну кривизну, але мають не вигідне становище у відсутності виразів замкнутої форми для формування кривої координати. Таким чином, вимоги до ЕОМ можуть виключити його застосування в режимі реального часу.

Методи генерації шляху сплайнами мають перевірену ефективність, вони використовуються щоб генерувати плавні безперервні шляхи викривлення з низькою обчислювальною вартістю [7].

Більшість методів планування шляху припускають, що платформа виконує шлях при низькій постійній швидкості. Це припущення означає, що динамічні характеристики РМП не впливають на точність алгоритму відстеження шляху, коли він проходить шлях. Проте в багатьох додатках визначається, що швидкість ускладнює шлях (наприклад, при уникненні руху перешкод). Так що слід поєднувати швидкісний профіль та спосіб планування траєкторії руху. Таким чином, траєкторія є складовою просторового плану (шляху) з планом часу (профіль швидкості).

Запланований маршрут повинен зберігати набір функцій для встановлення кривої, яка забезпечує шлях з хорошими кінематичними умовами. Ці властивості є функцією пристосування алгоритму і підходу до планування.

Існує різноманіття алгоритмів і методів побудови траєкторій руху для РМП. Однак до сих пір немає єдиного універсального підходу до побудови

траєкторій в середовищі з перешкодами. Можна виділити три групи методів планування шляху (траєкторії як геометричної кривої) [8]:

- методи потенційних функцій;
- клітинно-графові методи;
- методи ймовірнісної дорожньої карти.

У методах потенційних функцій побудова шляху платформи в задану точку здійснюється за рахунок діючих на нього потенційних сил двох типів: сили тяжіння до мети і сил відштовхування від кордонів перешкод. Для створення поля цих сил штучно формуються потенціали, і вирішується екстремальна задача без обмежень. Головним недоліком методу потенційних функцій є його громіздкість в разі багатовимірних просторів і складність потенційної функції.

Більш гнучкими логічними можливостями при обході відомих перешкод теоретично будь-якої складності мають клітинно-графові методи, які використовують опису проблемної середовища у вигляді клітин і відповідних їм графів. Далі шукується оптимальний шлях на графі, що в разі великої розмірності може бути важким.

Сучасний популярний метод ймовірнісної дорожньої карти (PRM – Probabilistic Road Map) показав має ефективність і переваги в порівнянні з класичними методами) [8]. Спочатку на фазі планування будується дорожня карта з допомогою повторюваного алгоритму побудови випадкових конфігурацій, і як «вузлів» дорожньої карти вибираються вільні, тобто не перетинають перешкоди. Потім знаходяться траєкторії, що з'єднують вибрані вузли за допомогою простого і швидкого алгоритму, який лежить в основі процедури планування шляху PRM, який називається локальним планувальником. Таким чином, формується граф (рис. 1.3), в якому конфігурації є вузлами графа, а обчислювані локальні планувальники шляху – дугами.

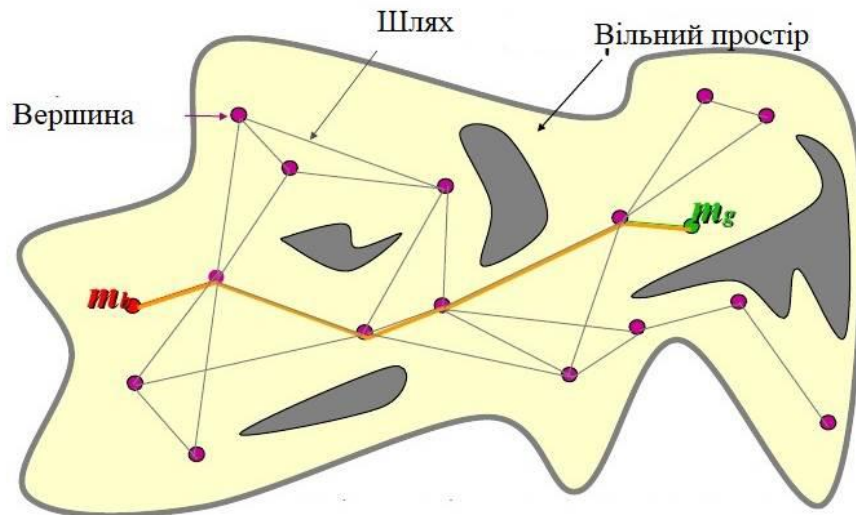


Рисунок 1.3 – Ймовірнісна дорожня карта

На фазі виконання вирішується завдання знаходження на мапі шляху між двома вільними конфігураціями робота аналогічно клітинно-графові методам. Підсумковий шлях виходить доповненням траєкторій з початкової і цільової точок у вузли графа. Зауважимо, що випадок заздалегідь невідомих перешкод зводиться до випадку статичних перешкод, коли в кожен момент часу є квазістатична карта цих перешкод. Звичайно, для ефективного виконання завдання потрібно, щоб і метод побудови траєкторій ефективним, тобто швидким [8].

Виходячі з проведеного аналізу та постановки задачі у технічному завданні автоматизована система повина реалізовувати розрахунок довжини траєкторії переміщення РМП з однієї точки до іншої, відображати результати у вигляді звіту та відображення траєкторії руху.

## 2 АЛГОРИТМИ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОГО ШЛЯХУ

### 2.1 Загальна інформація про алгоритми пошуку оптимального шляху

Всупреч тому, що пошук оптимального шляху є інстинктивним поняттям для живих істот, математичні дослідження в цій області розпочалися нещодавно. Одним з найбільш ранніх згаданих питань є завдання комівояжера, що сформулював Вільям Гамільтон на початку ХІХ століття. Таким завданням є пошук оптимального шляху в кількох містах України таким чином, щоб відвідати всі міста тільки один раз. Одним з перших відомих рішень можна назвати пошук в глибину, що винайшов Шарль П'єр Тремо. Слідом за ним з'явилося багато нових алгоритмів пошуку шляхів, зокрема, пошук в ширину, алгоритм Беллмана-Форда, алгоритм Дейкстри і  $A^*$  [13].

Одним з перших алгоритмів для зважених графів був алгоритм Дейкстри, опублікований в 1959 році. Однак для багатьох завдань він виявився неефективним через низькі швидкості та високі ресурсні витрати.

У 1964 році Нільс Нільсен винайшов евристичний підхід для збільшення швидкості алгоритму Дейкстри та дав йому назву  $A_1$ . Через 3 роки, в 1967 році, Рафаелю Бертраму вдалося значно поліпшити цей алгоритм, хоча він не зміг досягти оптимальності. Цей алгоритм отримав назву  $A_2$ . Через рік, у 1968 році, Пітер Е. Харт довів, що алгоритм  $A_2$  був оптимальним для використання евристики лише з незначними змінами. Отже, новий алгоритм отримав назву  $A^*$ , де зірочка позначає всі можливі номери версій [13].

На сьогодні алгоритми пошуку найкоротших шляхів є неймовірно популярними. Алгоритм  $A^*$ , як евристичний алгоритм, наразі найбільш ефективний в галузі кіберспорту і комп'ютерних або мобільних додатків.

До того ж, алгоритм є популярним у таких сферах, як парсинг, NPL (Обробка природної мови), СКС (Стохастична контекстно-вільна граматика).

Актуальність даної теми в тому, що сучасний ринок, де подібні алгоритми швидко розширюються, складність оброблюваних даних багаторазово підвищується, а мінімальні вимоги до ефективності роботи програм швидко ростуть.

Запланований до розробки алгоритм повинен характеризуватися деякими перевагами щодо питання швидкодії, витрат пам'яті або інших класичних характеристик оцінки ефективності програм.

Основна проблема, яку потрібно вирішити, – це переміщення об'єкта з початкової точки до кінцевої. Одиначне переміщення виглядає просто на відміну від пошуку оптимального шляху.

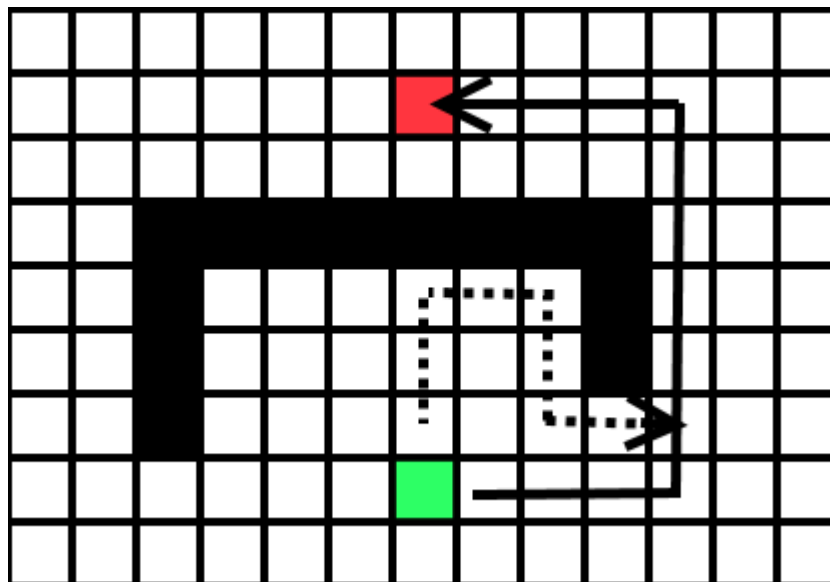


Рисунок 2.1 – Шляхи з попередніми пошуком і без

Як зображено на рисунку 2.1, зазвичай інформації про місцезнаходження цілі недостатньо для прийняття найбільш вигідного рішення, оскільки найпростіше рішення, не завжди є найоптимальнішим. Мета всіх алгоритмів пошуку оптимального шляху, з використанням наявних даних, – розв'язати задачу найбільш «оптимальним» способом, у даному випадку під «оптимальністю» мається на увазі набір характеристик алгоритму і автоматизованої системи, які його реалізують.

Сучасні алгоритми пошуку оптимального шляху, які використовують в ігрових моделях, засновані на алгоритмі Дейкстри. Найбільш популярним з них є  $A^*$ , тобто поліпшена версія алгоритму Дейкстри з використанням евристики для забезпечення підвищеної ефективності пошуку оптимального шляху. Як зазначав автор алгоритму, якщо евристика не переоцінює дійсне мінімальне значення досягнення мети, тоді  $A^*$  знайде шлях із мінімальним значенням до мети [14].

З'явилося безліч нових алгоритмів пошуку оптимального шляху, зокрема,  $D^*$ ,  $\Theta^*$ , Field  $D^*$  тощо.  $\Theta^*$  фактично є ідентичним до  $A^*$ , але повертає набори прямих шляхів, розглядаючи всі можливі випадки.  $D^*$  – це інкрементальний пошук, який підвищує свою ефективність шляхом знаходження повторень.

Алгоритм  $A^*$ , який розглядає автор у даній роботі, є «жадібним» алгоритмом. Іншими словами, він жертвує точністю на користь швидкості та легковажності, проте в декотрих задачах це є необхідністю, коли потрібна швидка реакція щодо руху.

Іноді завдання можуть мати мільйони різних рішень, однак у більшості випадків, можливості розглядати таке різноманіття просто відсутні. Проте наперекір стовідсотковій точності, алгоритм повинен і раніше давати максимально точне рішення, вкладаючись у задані параметри продуктивності.

## 2.2 Використання евристичної функції в алгоритмах пошуку

Перед тим, як розпочнемо розглядати алгоритми пошуку шляхів, необхідно згадати про евристику. У цілому, це теорія і практика організації виборчого пошуку під час вирішення складних інтелектуальних завдань. Такий тип евристики, який застосовуємо, цілком і повністю залежить від типу розв'язуваної проблеми. Не існує єдиної універсальної евристики, яка б видавала оптимальне рішення; вона повністю залежить від завдання.

Евристичну функцію  $h$  можна вважати допустимою, якщо вона ніколи не переоцінює дійсне мінімальне значення. Переважна кількість алгоритмів вимагає, щоб евристика була монотонною чи спадковою. Властивість монотонності означає, що у разі існування шляхів А-В-С і А-С (не обов'язково через В), то оцінка значення оптимального шляху від А до С повинна бути меншою або дорівнювати сумі оцінок шляхів А-В і В-С. Вибір евристики впливає на те, який шлях вибере алгоритм для знаходження рішення і, відповідно, може значно впливати на його продуктивність [13].

### 2.3 Порівняння алгоритмів пошуку оптимального шляху

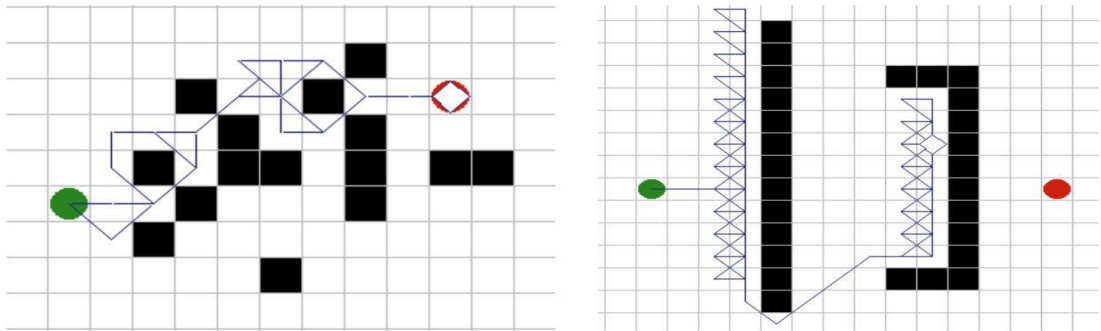
Існує велика кількість алгоритмів побудови оптимального шляху, що мають здатність обходити перешкоди. В основному, ці алгоритми зводяться до розв'язання завдання щодо пошуку оптимального шляху у графах:

- пошук  $A^*$ ;
- алгоритм Дейкстри;
- хвильовий алгоритм;
- навігаційна сітка;
- ієрархічні алгоритми;
- обхід перешкод.

Далі розглянемо ці алгоритми більш детально. Найпростіший підхід до проблеми полягає в ігноруванні перешкод до зіткнення з ними. Такий алгоритм буде мати приблизно такий вигляд: поки мета не досягнута потрібно вибрати напрямок для руху до мети, якщо цей напрямок євільним для руху, то можна рушати, або вибрати інший напрямок відповідно до стратегії обходу. Розглянемо кілька найпростіших алгоритмів обходу статичних перешкод.

Переміщення у випадковому напрямку. Якщо перешкоди є маленькими й опуклими, тоді об'єкт (показаний зеленою крапкою) може, ймовірно, обійти їх шляхом невеликого зсуву в бік доти, поки не досягне мети (позначено

червоною крапкою). На рисунку 2.2, а проілюстровано таку стратегію. Проблеми цього методу виникають у разі існування великих або увігнутих перешкод, як показано на рисунку 2.2, б – об'єкт може повністю застрягти або як мінімум витратити багато часу на пошук обхідного оптимального шляху.



а)

б)

а – перешкоди не увігнуті, невеликі; б – перешкоди увігнуті, великі

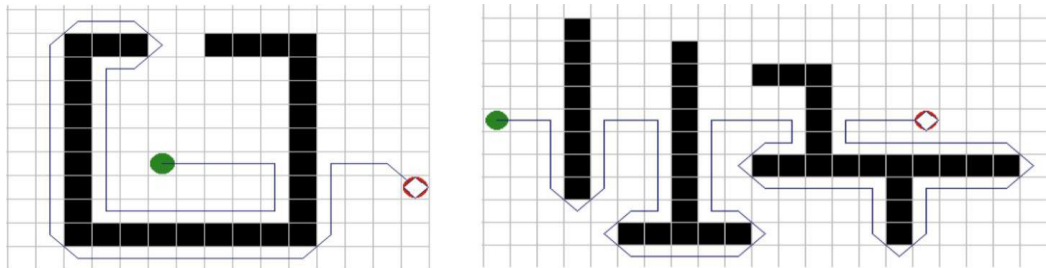
Рисунок 2.2 – Переміщення в випадковому напрямку

Найпростіший алгоритм об'їзду перешкод. Цей алгоритм розроблено для об'їзду простих перешкод, які зустрічаються під час пошукових робіт. Передбачається, що до початку руху робота немає ніяких даних про мапу, за якою здійснюватиметься рух. Уже під час руху з підсистеми комп'ютерного зору надходять дані, що дозволяють визначити наявність перешкоди. У разі виявлення підсистемою комп'ютерного зору об'єкта-перешкоди до розроблюваної системи передаються такі параметри:

- параметр перешкода набуває значення 0 (перешкоди немає) або 1 (перешкода є);
- параметр дистанція приймає цілочисельне позитивне значення відстані від платформи РМП до перешкоди;
- параметр діаметр, приймає цілочисельне позитивне значення, на яке система повинна відхилитися, щоб уникнути зіткнення;
- параметр напрямок об'їзду, вказує напрямок об'їзду (зліва / справа).



на трасування, ніж потрібно. Компромісом може бути комбінація обох підходів: завжди використовувати евристику простіше для зупинки трасування, але якщо вже зафіксовано зациклення, то краще перемикатися на надійну евристику.



а)

б)

а – ситуація з глухим кутом; б – ситуація зі складними перешкодами

Рисунок 2.4 – Надійне трасування

Попри те, що прості техніки обходу перешкод, які ми розглядали вище, часто можуть виконувати допустиму або навіть адекватну роботу, виникають ситуації, в яких розумним підходом є планування повного оптимального шляху перед початком переміщення об'єкта керування. Ці методи не можуть вирішити проблему зважених областей, яка полягає не так в обході перешкод, як в пошуці оптимального шляху з найменшим значенням серед інших варіантів, де значення місцевості може змінюватися [14].

В областях теорії графів і штучного інтелекту існує кілька алгоритмів, які можуть розв'язувати проблеми як зі складними перешкодами, так і зі зваженими областями. У літературі багато з цих алгоритмів представлені термінами зміни станів або проходу вузлами графа. Застосування таких алгоритмів пошуку оптимального шляху в геометричному просторі потребує простої адаптації: стан або вузол графа представляють об'єкт, який розташовано в певній клітинці, а пересування до сусідньої клітинки відповідає переміщенню до сусіднього стану або суміжних вузлів. Розглянемо деякі з цих алгоритмів.

Пошук в ширину самостійно досліджує всі напрямки. Основною суттю даного алгоритма є те, що починаючи зі стартового вузла, спочатку визначаються всі безпосередньо сусідні вузли, потім всі вузли за два кроки, потім за три і так далі, поки не буде досягнуто мети. На рисунку 3.5 продемонстровано процес пошуку. Алгоритм дозволяє знаходити шлях навколо перешкод, і він є найкоротшим, тобто одним з декількох найкоротших в довжину шляхів, якщо всі кроки з однаковим значенням. Цей алгоритм є неймовірно корисним, не тільки для звичайного пошуку оптимального шляху, але й для процедурної генерації карт, потокового пошуку оптимального шляху, карт відстаней та інших типів аналізу карт. Даний алгоритм можна вважати як базовий для всіх алгоритмів пошуку шляхів [14].

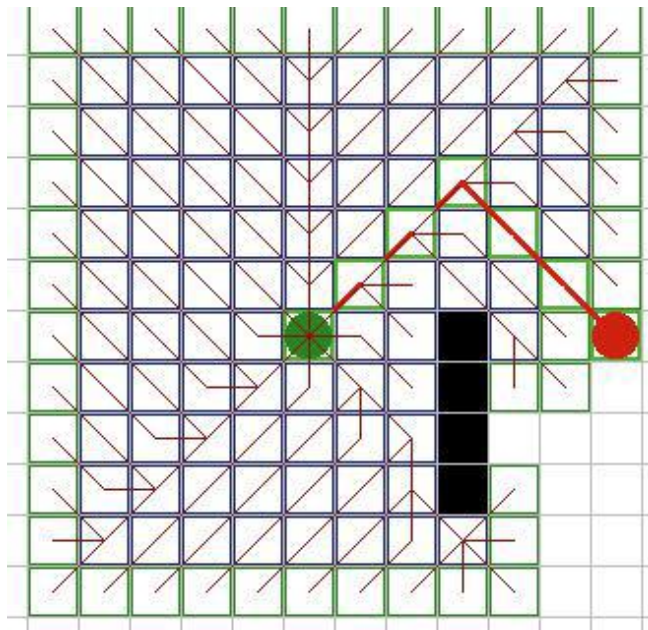


Рисунок 2.5 – Пошук в ширину

Проте, оскільки він не враховує значення переходів, він поза темою атестаційної роботи. По-перше, пошук проводиться рівномірно у всіх напрямках, замість того, щоб бути спрямованим в бік цілі. По-друге, не всі кроки рівні, принаймні, кроки по діагоналі мають бути довшими за звичайні.

Алгоритм Дейкстри. Едсгером Дейкстра в 1959 році запропонував класичний алгоритм щодо проходу по графу, межі якого мають різну вагу, дозволяє знаходити мінімальні шляхи від одного вузла графа до всіх інших, але такий алгоритм застосовується тільки для графів без негативної ваги. Для кожного кроку здійснюється пошук необроблених вузлів, які близькі до стартового, після чого розглядаються сусіди знайденого вузла, і встановлюються або оновлюються їхні відповідні відстані від старту. У разі порівняння з пошуком в ширину, можна виділити дві основні переваги даного алгоритму: він бере до уваги значення або довжину оптимального шляху і оновлює вузли, якщо до них знайдено кращий шлях. рисунок 2.6 демонструє чудову адаптацію алгоритму до значення місцевості [14].

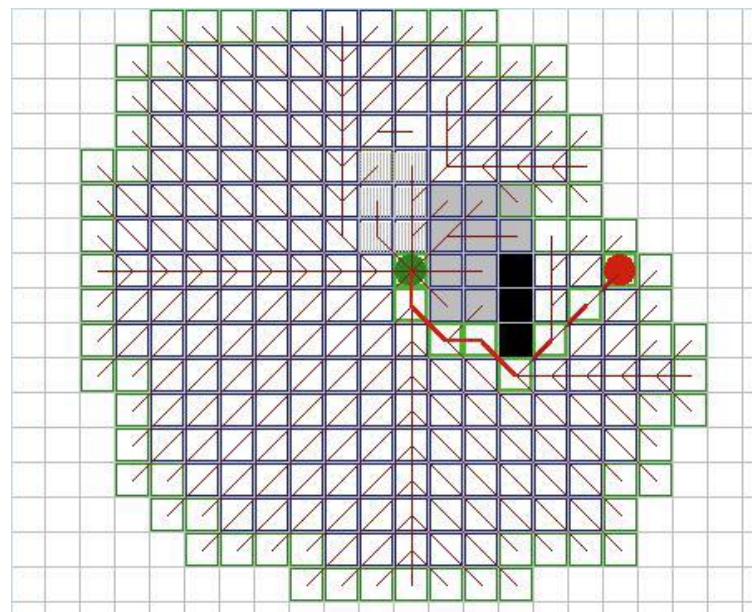


Рисунок 2.6 – Алгоритм Дейкстри

Показаний алгоритм (рисунок 2.6) дозволяє вибирати, які шляхи доцільно розглянути. Замість того, щоб розглянути всі шляхи, він надає перевагу шляхам з низьким значенням. За допомогою змін значення ми можемо вказати алгоритму щодо уникнення небажаних шляхів або навпаки рухатися за якимось певними напрямками. Коли у нас є значення, потрібно



наближенню до найкращого маршруту та йде через перший отсортований вузол. Формула евристики має вигляд:

$$f(n) = g(n) + h(n) , \quad (2.1)$$

де  $f(n)$  – значення оцінки, призначеної комірці  $n$ ;

$g(n)$  – найменше значення оптимального шляху в комірці  $n$  із стартової позиції;

$h(n)$  – евристична оцінка значення оптимального шляху до мети від комірки  $n$ .

Алгоритм стовідсотково знаходить найкоротший шлях, якщо той існує, доти, доки евристична оцінка  $h(n)$  є допустимою, таким чином, він ніколи не перевищує дійсно залишкову відстань до мети. Цей алгоритм майже ідеально використовує евристику: жоден з алгоритмів не розкриє менше число вузлів, ніж  $A^*$ , не враховуючи вузлів, що мають однакове значення. На рисунку 2.8, продемонстровано як алгоритм  $A^*$  вирішує проблемні для інших алгоритмів ситуації.

Цей алгоритм поєднує довжину оптимального шляху алгоритму Дейкстри та додає евристичну чисельну оцінку пройденого оптимального шляху.

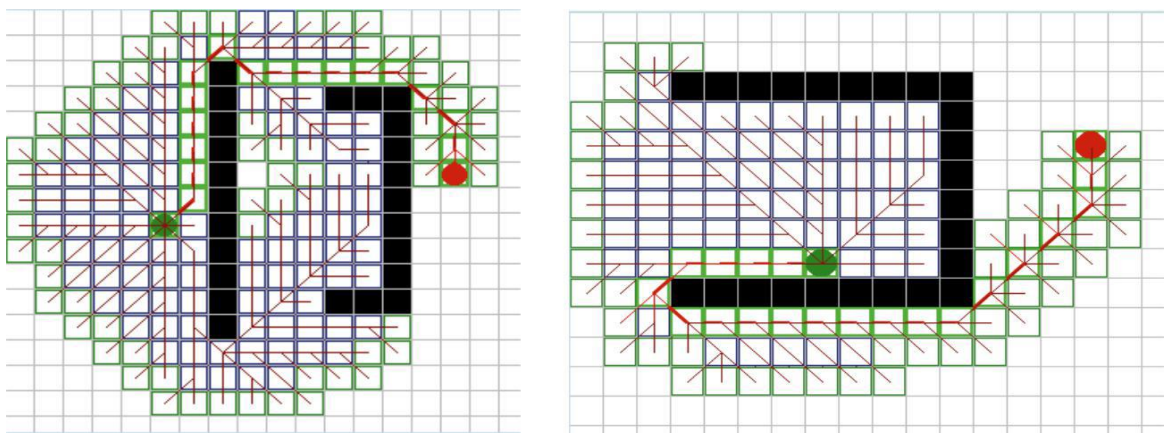


Рисунок 2.8 – Алгоритм  $A^*$

A\* (рисунок 2.8) – це модифікація алгоритму Дейкстри, що оптимізована для одного напрямку. Алгоритм Дейкстри може шукати шляхи до всіх точок, тоді як A\* шукає шлях до однієї. На практиці A\* виявляється дуже гнучким, тому існують різні варіації вдосконалення алгоритму для різних ситуацій. Але виникають ситуації, в яких алгоритм з різних причин не завжди може дати хороші результати [15].

Вимоги роботи в реальному масштабі часу, обмеження у пам'яті та процесорному часі створюють проблеми для продуктивної роботи навіть для A\*. Для пошуку оптимального шляху на великій карті може породжуватись багато об'єктів. Навіть якщо для них буде достатньо пам'яті, алгоритми для роботи з цими масивами можуть виявитися неефективними.

Існує велика кількість алгоритмів пошуку шляхів, проте у кожного з них є ситуації, в яких вони ефективні.

D\* або Динамічний A\* було введено для динамічної отримки оптимального шляху в процесі роботи. Він може оперативно модифікувати шлях, якщо робот (з прикріпленими датчиками) після переміщення зрозуміє, що шлях потрібно перерахувати. Крім того, алгоритм дуже схожий на A\*, тому що містить список закритих та відкритих комірок. Алгоритм D\* записує перешкоди, надаючи їм високе значення внутрішньої змінної перешкоди. Порожнім полям надається значення змінної пусто. Основна різниця полягає в тому, що шлях зчитується локально, враховуючи те, що сенсори мають дуже обмежену видимість. Так само присутні ще дві змінні – RAISE і LOWER, які позначають більше або менше значення доданої вершини до списку закритих комірок. Алгоритм спершу вважає початковий шлях від стартової точки до мети, а потім модифікує його, ґрунтуючись на значеннях оптимального шляху в процесі переміщення. Він повертає оптимальний шлях і гарантує, що у будь-який момент робот рухається до мети оптимальним шляхом [15].

Focussed D\* є модифікованою версією D\*, яка поєднує евристику A\* з алгоритмом D\*. Продуктивність focussed D\* вища за продуктивність базового

D\*. A\* можна вважати спеціальним випадком focussed D\*, де пошук оптимального шляху не є динамічним, а значення постійне [15].

Lifelong Planning A\* вважається інкрементальною версією пошуку A\*. Основна ідея алгоритму полягає в тому, що він застосовує базовий пошук оптимального шляху A\* на першій ітерації та зберігає кожний стан цього пошуку задля швидкого повторного пошуку. Інкрементальний пошук швидше знаходить рішення, ніж якщо його кожен раз шукати з початку [16].

D\* Lite, основа якого полягає в ідеї алгоритму, щоб підраховувати шлях у невідомій місцевості. D\* Lite є інкрементальним алгоритмом пошуку, що використовує інформацію, отриману від попереднього пошуку, щоб полегшити підрахунок нових шляхів (як в LPA\*). D\* Lite дуже схожий на алгоритм D\*, але коротший і такий же за ефективністю [15].

## 2.4 Обґрунтування вибору алгоритму та суть оптимізації

Жадібний пошук за найкращим першим збігом та A\* використовують евристичну функцію. Але A\* поєднує й евристику, й упорядкування з алгоритму Дейкстри.

A\* переглядає шляхи, що можуть вести від стартової клітини до кінцевої, поки не буде знайдено мінімальний шлях. A\* переглядає спочатку маршрути, які, на його думку, ведуть до мети. Від жадібного алгоритму, що є алгоритмом пошуку першого найкращого збігу, A\* відрізняється тим, що під час вибору вершини він враховує весь шлях, пройдений до неї [15].

Для поліпшення роботи алгоритму провели модифікацію однієї його складової, а саме шлях, пройдений від стартової позиції до поточної клітини. Було штучно зменшено  $g(n)$  – найменше значення прибуття клітини  $n$  з точки старту, що зробило його більш жадібним до пошуку.

Евристика збільшує складність і витрати часу центрального процесору (ЦП). Зменшення евристики збільшує кількість клітин, які будуть розглянуті.

Оптимізація алгоритму дає перевагу у швидкості пошуку на відкритому просторі та на картах великого масштабу з нескладними перешкодами. З мінусів зазначимо те, що така реалізація вимагає більше пам'яті для обчислення маршруту [15]. Порівняння звичайного алгоритму і модифікованого наведено у наступному розділі даної кваліфікаційної роботи.

## 3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

### 3.1 Огляд можливостей автоматизованої системи

Для регулювання руху об'єкта керування, тобто для об'їзду можливих перешкод, які з'являються на оптимального шляху проходження, використовується імітація підсистеми комп'ютерного зору. Розглянемо реалізацію спільної роботи системи керування РМП з підсистемою імітованого комп'ютерного зору. На рисунку 3.1 наведено початкову позицію РМП.

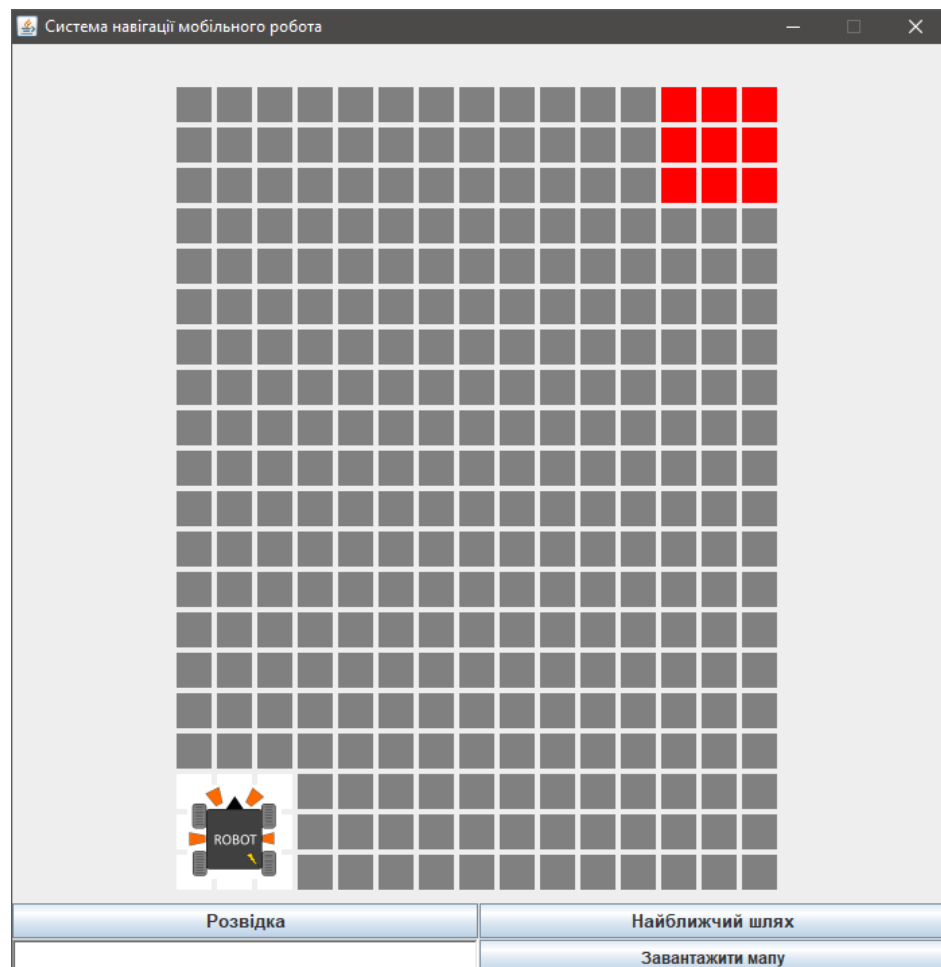


Рисунок 3.1 – Початкова позиція РМП

Під час старту моделювання поведінки об'єкта керування у головному вікні автоматизованої системи можна побачити РМП, нерозвідану мапу та кнопки: Розвідка, Найближчий шлях та Завантажити мапу.

Для початку потрібно завантажити мапу до системи за допомогою кнопки Завантажити мапу. Файл карти виглядає як набір нулів та одиниць. На рисунку 3.2 зіставлено мапу у програмі з файлом Map3.txt. Використання файлів карти активізує гнучкість у розробці, редагуванні та тестуванні рухів РМП. Нуль у файлі позначає, що шлях вільний, одиниця – перешкода. Наочне відображення карти надає користувачу можливість заздалегідь прослідкувати, де і які перешкоди можуть з'явитися у РМП під час розвідки. У цей час РМП не має жодних знань про карту.

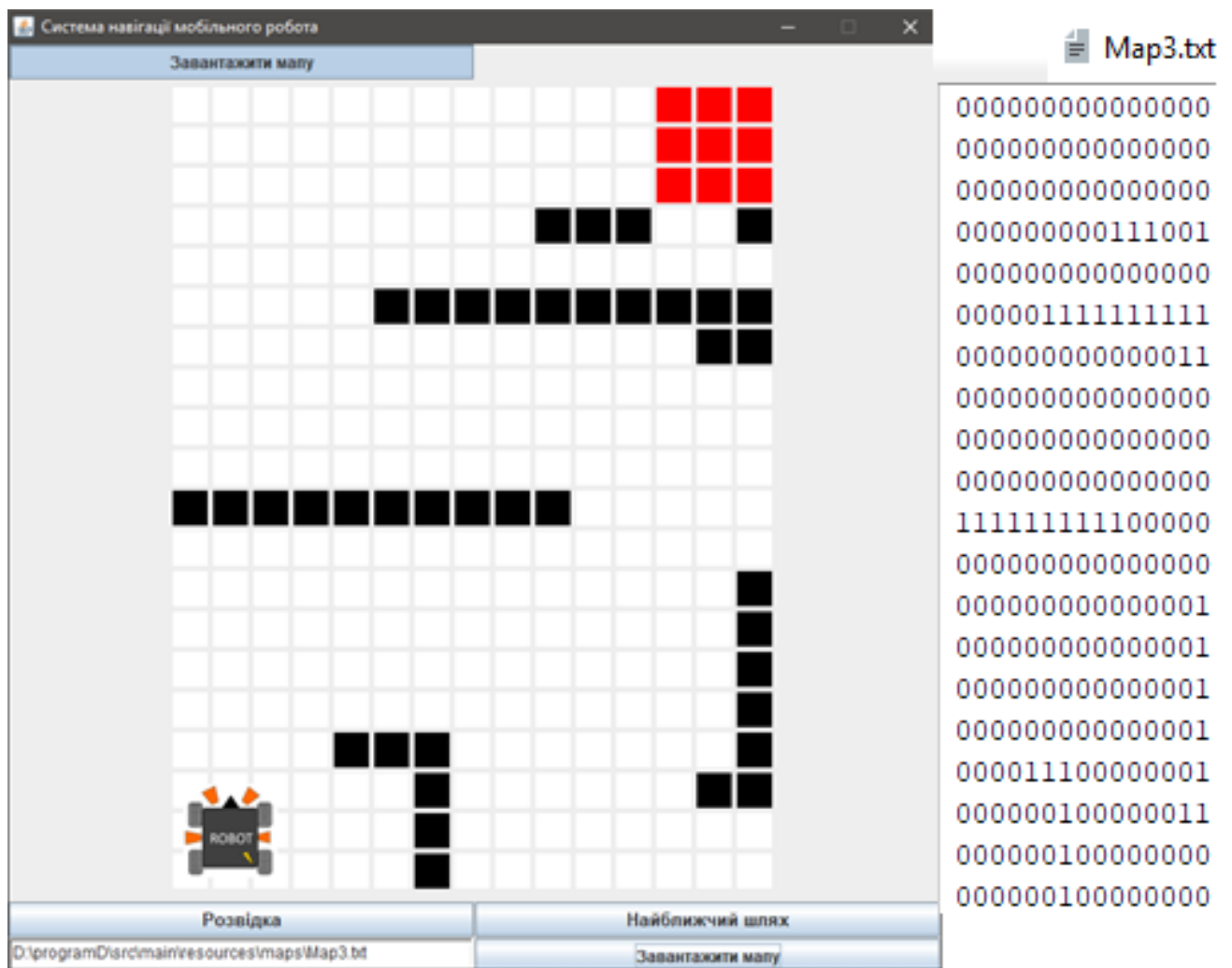


Рисунок 3.2 – Завантаження карти

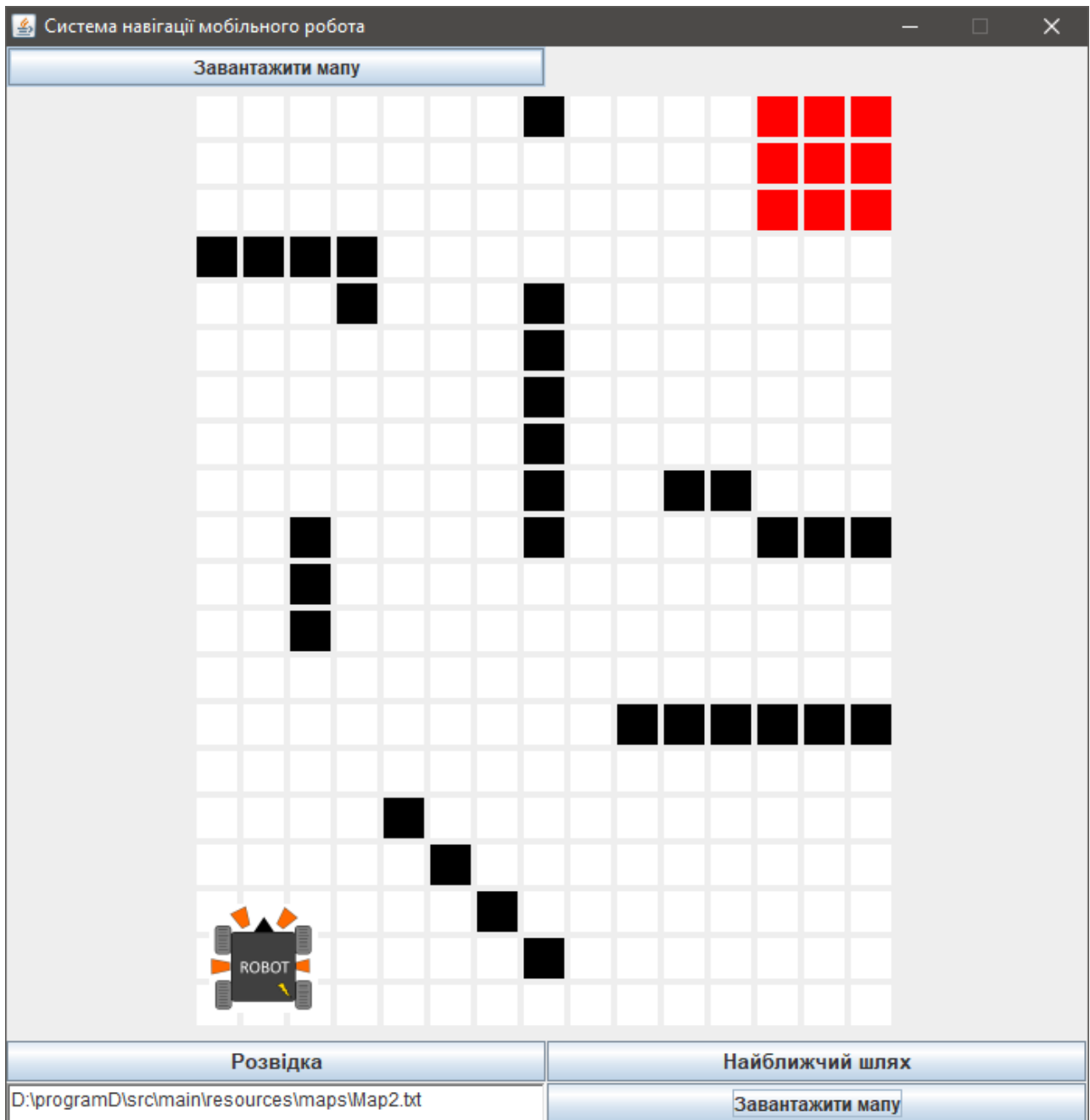


Рисунок 3.3 – Завантаження карти

Завантажимо іншу карту, на якій буде продемонстровано алгоритм розвідки (рисунок 3.3). Після того, як мапу додано до автоматизованої системи, можна розпочинати розвідку.

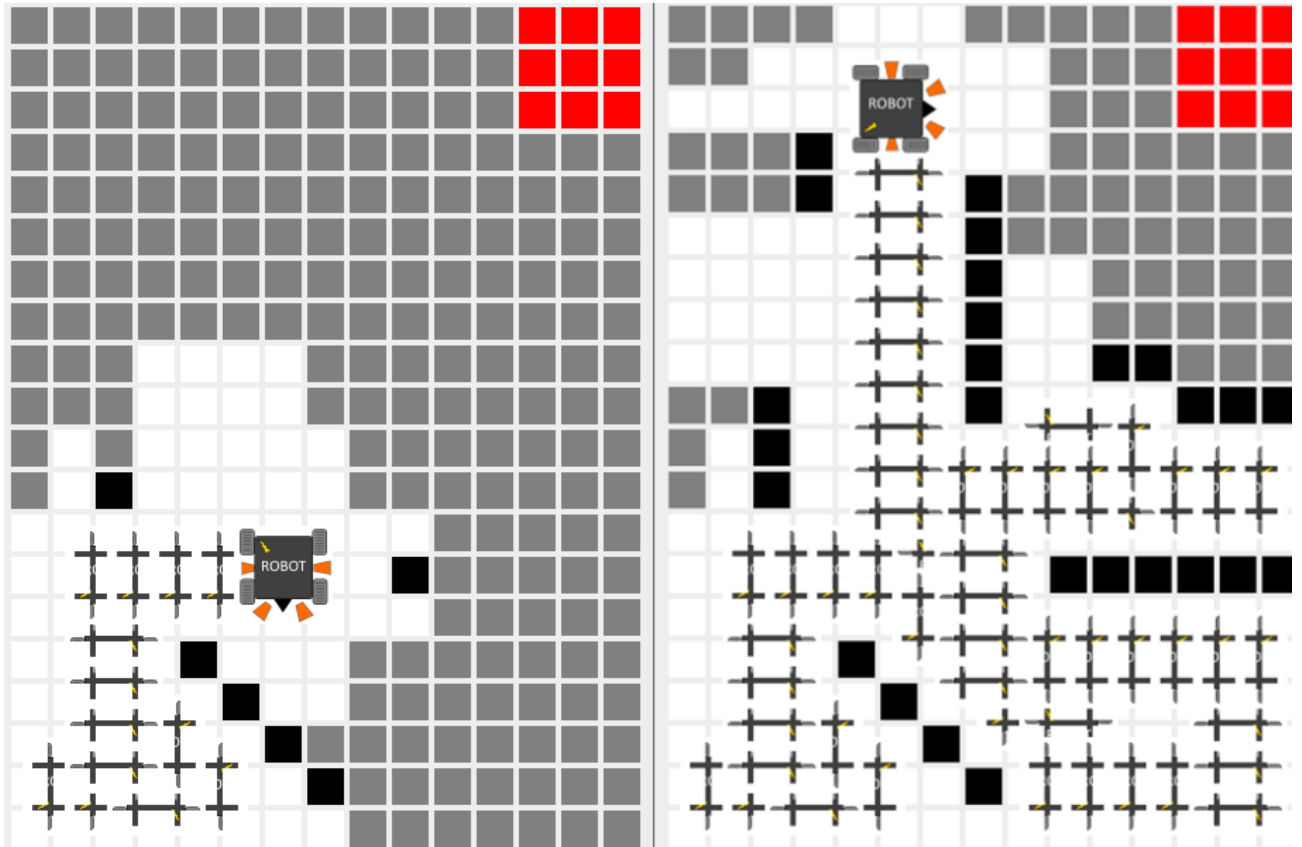


Рисунок 3.4 – Розвідка карти

Під час проведення розвідки території (рисунок 3.4) РМП спирається на дані з датчиків. Чорними клітинами позначено відомі перешкоди, а білими – відомі вільні позиції на карті. Сірі – невідомі. Червоні клітини – мета РМП, найкоротший шлях до якої розглянемо далі. Сірий слід – це місця, якими вже проїхав робот. Після того, як роботом відкрито всі 100 % клітин, він повернеться до стартової позиції. У разі повернення до стартової позиції, коли не всі клітини ще відкриті, ці клітини вважатимуться недосяжними і робот зупиниться на стартовій позиції та очікуватиме від оператора наступних дій. Повністю розвідану карту зображено на рисунку 3.5.

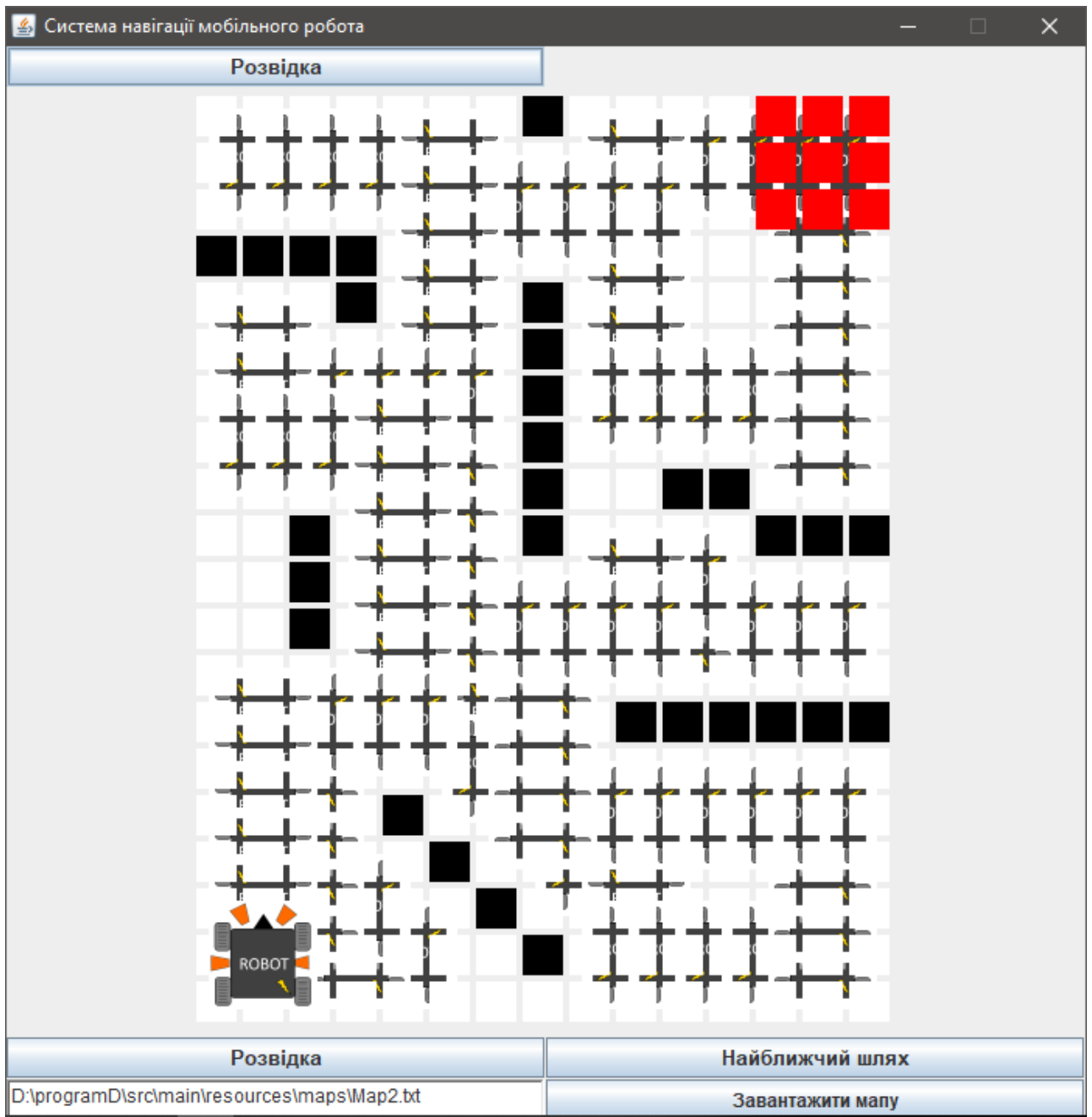


Рисунок 3.5 – Закінчення розвідки

Таким чином, розвідку закінчено та у консолі можна побачити такі результати (рисунок 3.6):

```
Розвідка закінчена!  
100.00% розвідано, 300 клітин знайдено у цілому.
```

Рисунок 3.6 – Результати розвідки

Алгоритм оптимального шляху залучається після того, як уже територія розвідана, цільова позиція РМП знайдена, а кнопка Найближчий шлях натиснута. Результати роботи автоматизованої системи зображено на рисунку 3.7.

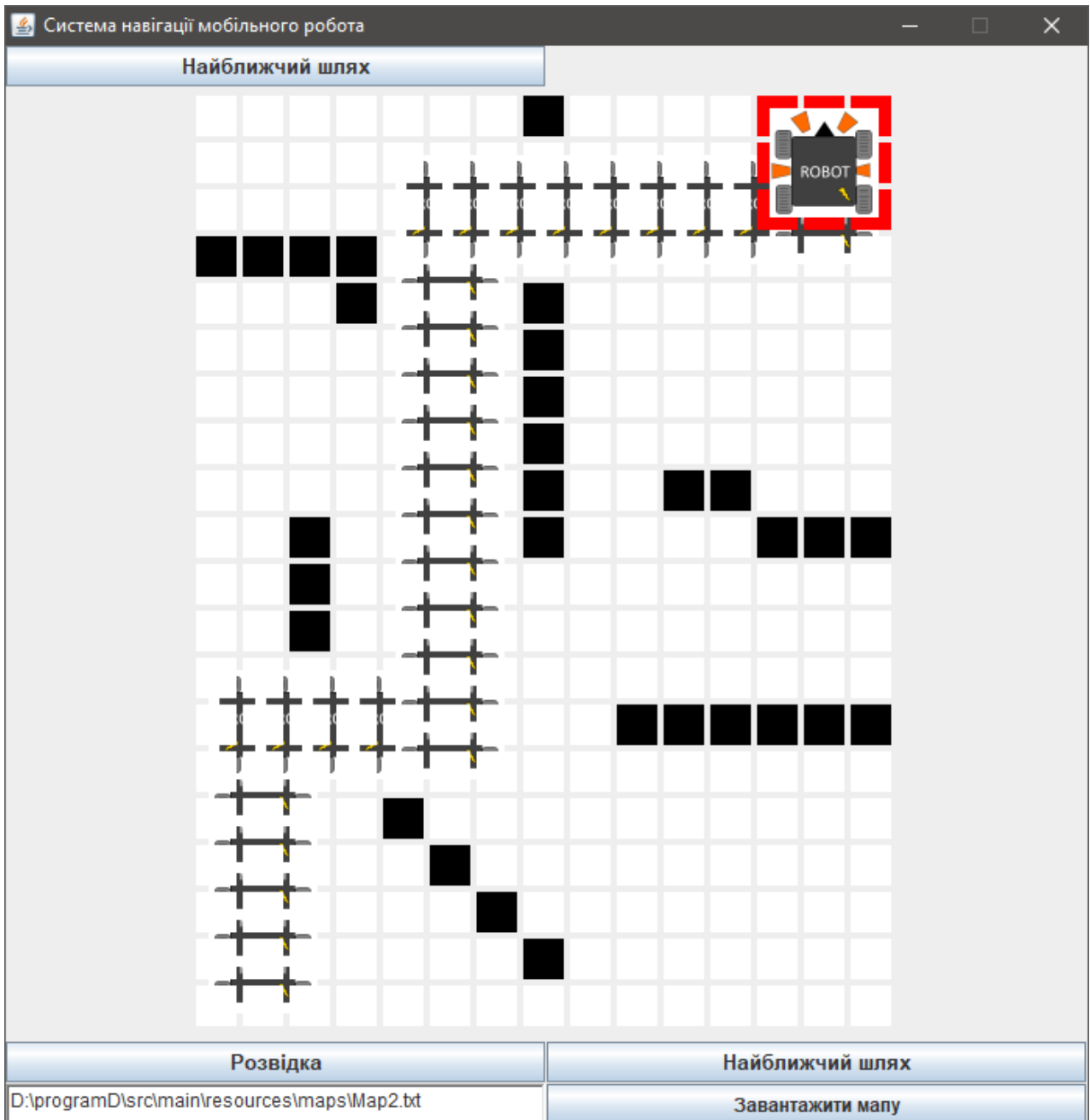


Рисунок 3.7 – Пошук оптимального шляху

Після натискання кнопки Найближчий шлях, проводяться розрахунки алгоритмом A\*. На рисунку 3.8 зображено блок-схему роботи алгоритму оптимального шляху.

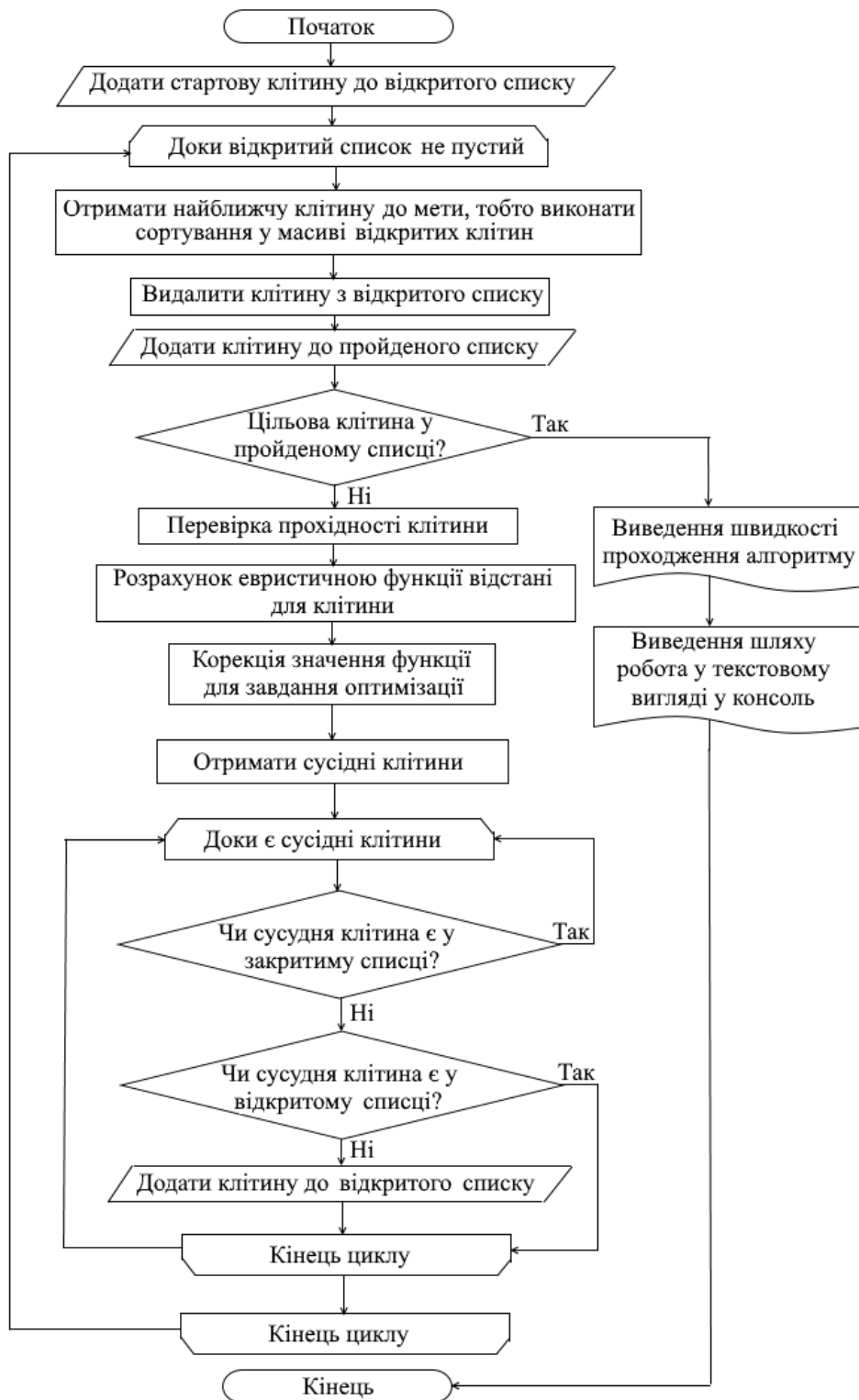
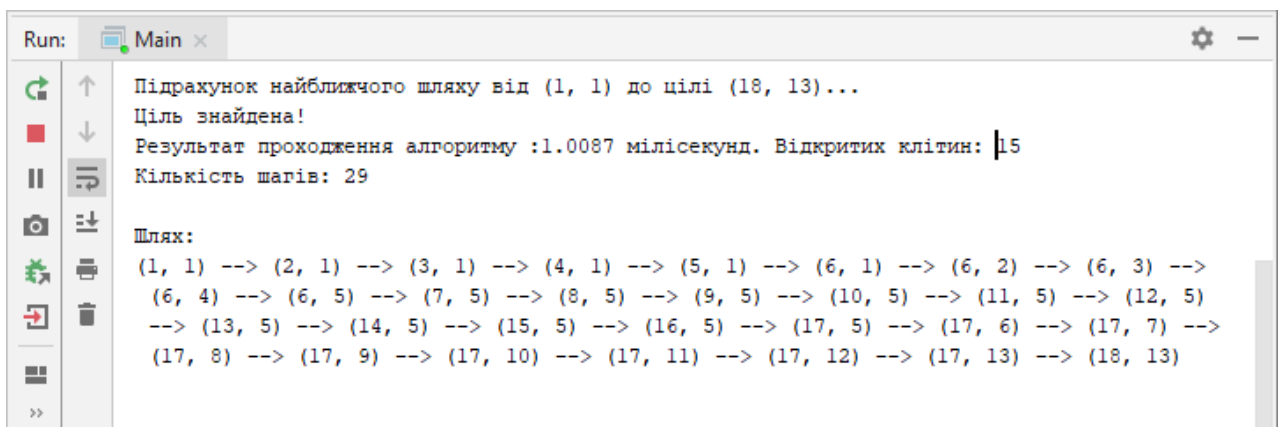


Рисунок 3.8 – Блок-схема алгоритму найближчого оптимального шляху

Код реалізації оптимізованого алгоритму A\* (Додаток А), в якому змінна `DECREASE_G_COST` штучно змінює параметр евристичної оцінки пройденого оптимального шляху, внаслідок чого скорочується час на прийняття рішення РМП, але пам'ять, яка необхідна для розрахунків при цьому збільшується.

### 3.2 Аналіз результатів оптимізованого алгоритму A\*

Під час оптимізації алгоритму вдалось прискорити час пошуку оптимального шляху на 20 %, але водночас затрати пам'яті збільшились на 35 %.

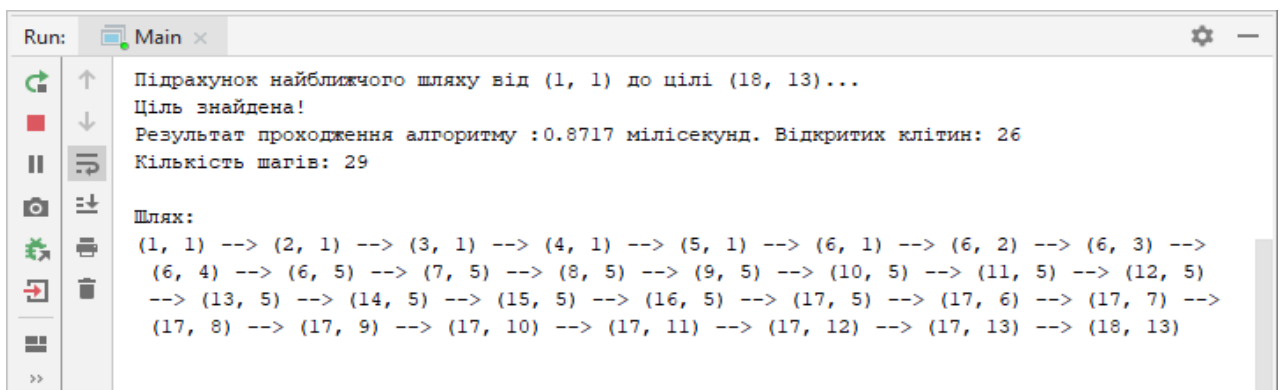


```

Run: Main x
Підрахунок найближчого шляху від (1, 1) до цілі (18, 13)...
Ціль знайдена!
Результат проходження алгоритму :1.0087 мілісекунд. Відкритих клітин: 15
Кількість шагів: 29

Шлях:
(1, 1) --> (2, 1) --> (3, 1) --> (4, 1) --> (5, 1) --> (6, 1) --> (6, 2) --> (6, 3) -->
(6, 4) --> (6, 5) --> (7, 5) --> (8, 5) --> (9, 5) --> (10, 5) --> (11, 5) --> (12, 5)
--> (13, 5) --> (14, 5) --> (15, 5) --> (16, 5) --> (17, 5) --> (17, 6) --> (17, 7) -->
(17, 8) --> (17, 9) --> (17, 10) --> (17, 11) --> (17, 12) --> (17, 13) --> (18, 13)
  
```

Рисунок 3.9 – Результати роботи звичайного алгоритму пошуку оптимального шляху



```

Run: Main x
Підрахунок найближчого шляху від (1, 1) до цілі (18, 13)...
Ціль знайдена!
Результат проходження алгоритму :0.8717 мілісекунд. Відкритих клітин: 26
Кількість шагів: 29

Шлях:
(1, 1) --> (2, 1) --> (3, 1) --> (4, 1) --> (5, 1) --> (6, 1) --> (6, 2) --> (6, 3) -->
(6, 4) --> (6, 5) --> (7, 5) --> (8, 5) --> (9, 5) --> (10, 5) --> (11, 5) --> (12, 5)
--> (13, 5) --> (14, 5) --> (15, 5) --> (16, 5) --> (17, 5) --> (17, 6) --> (17, 7) -->
(17, 8) --> (17, 9) --> (17, 10) --> (17, 11) --> (17, 12) --> (17, 13) --> (18, 13)
  
```

Рисунок 3.10 – Результати роботи модифікованого алгоритму пошуку оптимального шляху

На картах великого обсягу час пошуку ставатиме все меншим і меншим, а витрати в пам'яті збільшаться, проте незначно. Чим більше РМП наблизатиметься до своєї мети, тим менше йому потрібно провести розрахунків.

У таблиці 3.1 продемонстровано результати проведення декількох експериментів.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики МБЛ

№	Карта	А*		Оптимізований А*		Довжина оптимального шляху, клітин
		Час розрахунків, мс	Вузлів у пам'яті, шт	Час розрахунків, мс	Вузлів у пам'яті, шт	
1	порожня	0,6654	27	0,3674	27	29
2		0,9531	27	0,6023	27	29
3	проста	0,6992	14	0,5284	24	51
4		0,883	14	0,4898	24	51
5	проста	0,6844	12	0,6851	21	45
6		0,4348	12	0,4122	21	45
7	проста	0,5817	17	0,4952	29	52
8		0,6821	17	0,3034	29	52
9	складна	0,7825	14	0,8376	45	63
10		0,8829	14	0,9122	45	63

Проаналізувавши дану таблицю, було побудовано графік залежності пам'яті від часу виконання алгоритму. На рисунку 3.11 можна простежити закономірність. Оптимізацію проведено успішно, алгоритм став більш

жадібним до часу пошуку, що у середньому дало 30 % до швидкості виконання алгоритму, однак спостерігаються втрати в пам'яті до 40 %.

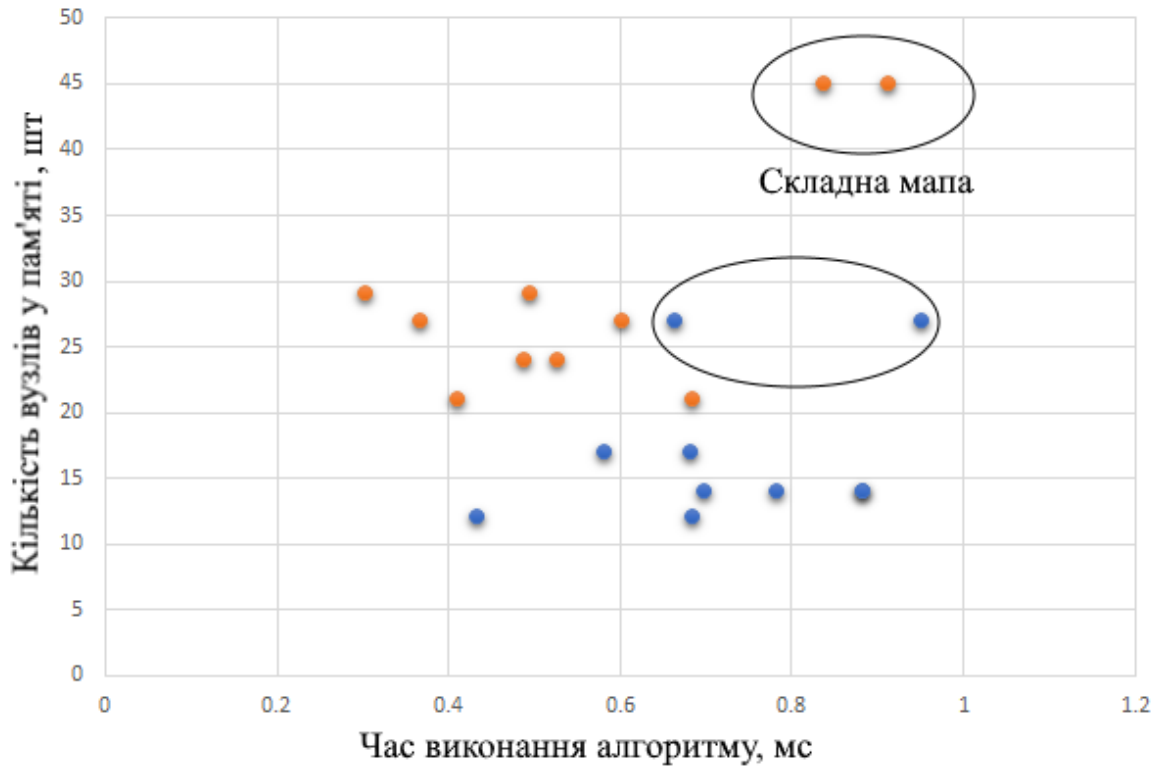


Рисунок 3.11 – Графік залежності втрат пам'яті від часу виконання алгоритму

Оптимізація не є ефективною для карт великого масштабу зі складними перешкодами, а також для робототехнічних систем з малою кількістю пам'яті для розрахунків.

## 4 ЗАХОДИ І РОЗРАХУНКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНИХ УМОВ ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз умов праці на робочому місці

На робочому місці оператора ПК згідно виникають небезпечні та шкідливі фактори: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітленості, шкідливі речовини, підвищений рівень електромагнітних випромінювань радіочастот, висока напруга електричної мережі, статична електрика та інші. Робота з ПК супроводжується також підвищеним ступенем напруженості трудового процесу. При систематичному впливі виробничих факторів, які не відповідають нормативним показникам, зростає рівень професійно зумовленої захворюваності працюючих та можуть виникнути професійні захворювання органів зору, руху, нервової системи. Таким чином, вивчення умов праці на робочому місці оператора ПК є необхідною умовою запобігання негативних наслідків впливу небезпечних та шкідливих факторів.

Організація робочого місця. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце оператора ПК, загальною площею 48 м<sup>2</sup>, і висотою стелі 3,5 м. У приміщенні знаходиться 6 робочих місць з ПК. Кожне робоче місце обладнане робочим столом, стільцем та персональним комп'ютером, що складається з монітора, системного блоку, клавіатури та миші.

### 4.2 Промислова безпека на робочому місці

Живлення ПК здійснюється від трифазної чотирьох електричної мережі змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою 220 В, частотою 50 Гц. Згідно НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення можна віднести до категорії без

підвищеної небезпеки, так як в приміщенні відсутні чинники, які викликають підвищену або особливу небезпеку.

Для створення безпечних умов праці необхідно провести ряд організаційних і технічних заходів. Згідно НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом в приміщенні застосовується система занулення.

#### 4.3 Виробнича санітарія у приміщенні

Робота оператора ПК за енерговитратами відноситься до категорії легких робіт. В таблиці 4.1 наведені оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях, де виконуються роботи операторського типу [16].

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату для приміщень з ПК

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	22 – 24 °С; 40 – 60 %; до 0,1 м/с
Теплий	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	23 – 25 °С; 40 – 60 %; 0,1 – 0,2 м/с

Виміряні за допомогою приладів температура та вологість у лабораторії відповідають вказаним у таблиці для теплого періоду року. Слід зазначити, що для нормалізації параметрів мікроклімату слід використовувати у приміщеннях кондиціонування повітря, або забезпечити подачу свіжого повітря системами вентиляції.

Лабораторія, де виконується розробка конструкції модуля, має наступні характеристики:

- площа приміщення 48 м<sup>2</sup> (8×6 м);
- висота – 3,5 м;
- кількість робочих місць – 6 шт.;

– обладнання – стіл з ПК і периферією – 6 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, має забезпечувати 6 м<sup>2</sup> площі та 20 м<sup>3</sup> обсягу на одне окреме робоче місце з ПК [16]. Площа приміщення 48 м<sup>2</sup> та об'єм 168 м<sup>3</sup>, на кожне робоче місце приходить 8 м<sup>2</sup> площі і об'єм 28 м<sup>3</sup>, тобто вимога виконана.

Приміщення з ПК повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5 %.

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, викладеної в [16].

Розрахункова формула методу:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (4.1)$$

де  $W$  – питома потужність, Вт/м<sup>2</sup>;

$S$  – площа приміщення, м<sup>2</sup>;

$W_{\Sigma}$  – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{ce} \cdot n_{ce}, \quad (4.2)$$

де  $W_{ce}$  – потужність одного світильника, Вт;

$n_{ce}$  – кількість світильників в приміщенні.

$$W_{\Sigma} = 100 \cdot 4 = 400 \text{ Вт}, \quad (4.3)$$

$$W = \frac{400}{48} = 8,33 \text{ Вт/м}^2. \quad (4.4)$$

Питомої потужності 8,33 Вт/м<sup>2</sup> по таблиці Б.3 із [16] відповідає освітленість в 250 лк при мінімальній допустимій освітленості 300 лк.

Отже, для створення сприятливих зорових умов в лабораторії необхідно збільшити кількість світильників або замінити лампи в світильниках на більш потужні.

#### 4.4 Пожежна безпека виробничого приміщення

Пожежна безпека – стан об'єкта, при якому виключається можливість пожежі, а у випадку його виникнення запобігає вплив на людей небезпечних факторів пожежі й забезпечується захист матеріальних цінностей.

Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі й системою пожежного захисту. У всіх службових приміщеннях обов'язково повинен бути «План евакуації людей при пожежі», що регламентує дії персоналу у випадку виникнення вогнища загоряння, що й указує місця розташування пожежної техніки.

Горючими компонентами у виробничому приміщенні є: перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів тощо.

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження його поширення, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

Джерелами запалювання у виробничому приміщенні можуть бути електронні схеми від ПК, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрою електроживлення, кондиціонування повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри й дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

У сучасних ПК дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості друг від друга розташовуються сполучні проведення, кабелі. При протіканні по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відводу надлишкової теплоти від ПК служать системи вентиляції й кондиціонування повітря. При постійній дії ці системи являють собою додаткову пожежну небезпеку.

Енергопостачання виробничого приміщення здійснюється за допомогою трансформаторної станції та за допомогою двигун-генераторних агрегатів. На трансформаторних підстанціях особливу небезпеку представляють трансформатори які мають масляне охолодження. У зв'язку із цим перевагу слід віддавати сухим трансформаторам.

## ВИСНОВКИ

Автономна навігація РМП допомагає в автоматизації фізичних завдань, які вимагають їх переміщення до різних місць навколишнього середовища. У кваліфікаційній роботі було розглянуто різні підходи щодо автоматизації прийняття рішень для навігації роботів, використовуючи набуті просторові знання. Залежність реактивних методів від даних безперервного датчика дозволяє їм швидко адаптуватися до змін середовища, проте доцільні методи можуть приймати довгострокові рішення, що призводять до значного підвищення ефективності. Гібридні підходи – це спроби зібрати найкраще з обох сторін. Актуальним є дослідження людської навігації, оскільки багато робототехнічних пристроїв залучено у галузях, в яких люди орієнтуються з відносною легкістю. Обмеження у сучасних підходах до прийняття рішень щодо навігації локалізують саме використання РМП.

Розроблено та досліджено два різні алгоритми керування РМП: алгоритм розвідки та алгоритм найближчого оптимального шляху.

Під час тестування алгоритму розвідки вдалося виявити недолік – відсутність гнучкості алгоритму. У разі зміни параметрів об'єкта керування (розміру, дальності датчиків) необхідно вносити зміни і до алгоритму роботи всієї системи.

Розробка алгоритмів навігації РМП є важливим і новим завданням галузі робототехніки. Значимість роботи обумовлено широким розповсюдженням РМП за останні роки.

Проведено велику кількість досліджень, пов'язаних з розробкою керування РМП, зокрема, складання карти, побудова оптимального маршруту, однак мало уваги приділено траєкторіям з обмеженнями швидкості в конкретних точках.

У даній кваліфікаційній роботі автором було проведено дослідження щодо розробки навігаційної системи РМП, детально розглянуто багато аспектів розробки модулів, системи знаходження мінімального оптимального шляху.

Було проведено огляд алгоритмів, які застосовуються в навігації для побудови маршруту з уникненням перешкод.

Крім того, було розв'язано завдання побудови мінімального маршруту від стартової позиції до цільової, було сформульовано та розраховано алгоритм, а також запрограмовано та протестовано мовою програмування JAVA.

За результатами моделювання зроблено висновок, що РМП успішно виконує завдання розвідки та пошуку мінімального оптимального шляху.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація «Звіти у сфері науки і техніки». Структура та правила оформлювання. / В. Земцева; Ю. Поліщук, канд. фіз.-мат. наук; Р. Санченко, канд. техн. наук; Л. Шрамко; А. Ямчук (науковий керівник) ДП «УкрНДНЦ» від 22 червня 2015р. № 61 з 2017-07-01.
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 програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків: ХНУРЕ, 2023. – 64 с.
3. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, В.А. Андрусевич, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2022. – 151 с.
4. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. І. Филипенко, Н. П. Демська, С. П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.
5. Невлюдов І.Ш. Людино-машинний інтерфейс в технічних засобах автоматизації: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, Б.О. Шостак. – Харків : «ХТМТ», 2019. – 244 с.
6. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control / 2nd edition. – Addison-Wesley, 2019. – 450 p.— ISBN 0-201-09528-9

7. Mouna Fradi, Faïda Mhenni, Raoudha Gaha, Abdelfattah Mlika, Jean-Yves Choley, Category theory-based collaborative design methodology for mechatronic systems, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 55, 2023.

8. Річард Е. Вудс. Цифрова обробка зображень: підруч. / Річард Е. Вудс., Рафаел С. Гонсалес; К.:ТЕХНОСФЕРА: 2019. – 1105 с. – ISBN:978-5-946-331-8.

9. Chol-Guk Choe, Jong-Hyon Pak, Chol-Song Rim, Joint near-isometry and optimal sparse recovery: Nonuniform recovery from multi-sensor measurements, *Signal Processing*, Volume 208, 2023, 108980, ISSN 0165-1684.

10. Джосепс Ховс. *Android Application Programming with OpenCV* / Джосепс Ховс. O'Reilly Media, – 190 с.

11. Джон Кенні. *A Computational Approach to Edge Detection* / Джон Кенні. O'Reilly Media, – 305 с.

12. Гэри Брадскі. *Learning OpenCV. Computer Vision with the OpenCV Library* / підруч. / Гэри Брадскі, Адріан Кехлер; – O'Reilly Media, 2018. – 580 с..

13. Mehran Mirzaei, Pavel Ripka, Vaclav Grim, An eddy current speed sensor with a novel configuration of longitudinal and transversal coils, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 352, 2023, 114201.

14. *Діагностика та контроль робочих процесів: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної та дистанційної форм навчання* / В. М. Доля – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 129 с.

15. Трохимчук Р.М. *Теорія графів* / Р.М. Трохимчук.– К.: РВЦ "Київський університет", 2018.– 43 с.

16. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Організація керування умовами праці» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т.Є. Стиценко, Г.В. Пронюк, Н.М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.