

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

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

## АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Розробка системи навчання для транспортного мобільного робота  
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, гр. КІТПВм-19-1  
Водоп'янов А.І.  
(прізвище, ініціали)

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

Тип програми освітньо-професійний

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

Керівник доц. Яшков І.О.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми	освітньо-професійний
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

ЗАВДАННЯ  
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_

Водоп'янову Артему Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка системи навчання для транспортного мобільного робота

затверджена наказом по університету від 02.11.2020 р. № 1511 Ст.

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 16.12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Транспортний мобільний робот,  
призначений для виконання транспортних операцій з переміщення виробів;

3.2 Інформаційне моделювання; 3.3 Динамічне навколишнє середовище;

3.4 Поновлення карти середовища; 3.5 Модульність підсистеми;

3.6 Оформлення пояснювальної записки згідно з ДСТУ 3008:2015.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

4.1 Провести аналіз технічного завдання;

4.2 Моделювання функціонування транспортного мобільного робота;

4.3 Управління транспортним мобільним роботом на основі  
кінцево-автоматного підходу;

4.4 Метод координації і планування;

4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) 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	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	10.09.2020 р.	виконано
2	Моделювання функціонування транспортного мобільного робота	24.09.2020 р.	виконано
3	Управління транспортним мобільним роботом	08.11.2020 р.	виконано
4	Моделювання системи навчання транспортного мобільного робота	23.11.2020 р.	виконано
5	Охорона праці	29.11.2020 р.	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	01.12.2020 р.	виконано
7	Подання роботи до ЕК	16.12.2020 р.	виконано

Дата видачі завдання 01 вересня 2020 р.

Студент \_\_\_\_\_ Водоп'янов А.І.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. Яшков І.О.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 97 с., 19 рис., 2 дод., 20 джерел.

ТРАНСПОРТНИЙ МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, СИСТЕМА НАВЧАННЯ, АВТОМАТИЗОВАНЕ ВИРОБНИЦТВО, АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ, ІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, МЕТОД КООРДИНАЦІЇ ТА ПЛАНУВАННЯ.

Об'єкт дослідження – системи управління транспортними мобільними роботами в автоматизованому виробництві.

Мета роботи – моделювання функціонування системи навчання транспортного мобільного робота в автоматизованому виробництві.

Предмет дослідження – методи інтелектуалізації управління транспортного мобільного робота.

Виконано моделювання функціонування транспортного мобільного робота в автоматизованому виробництві та організація тактико-технічного планування інформаційно-рухових дій.

Проаналізована узагальнена архітектура транспортного мобільного робота і загальний принцип побудови його моделі. Проаналізовано алгоритми планування. Представлені інформаційні моделі багатокomпонентного транспортного мобільного робота. Виконано вибір способу організації управління робототехнічною системою. Наведено метод координації і планування інтелектуалізації управління транспортного робота в складі автоматизованого виробництва.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що отримала подальший розвиток система адаптивного управління роботів, за допомогою методу інтелектуалізації управління, що дозволило здійснити інформаційне моделювання функціонування системи навчання транспортного мобільного робота в автоматизованому виробництві.

## **ABSTRACT**

The explanatory note contains 97 pp., 19 fig., 2 add., 20 sources.

**TRANSPORT MOBILE ROBOT, TRAINING SYSTEM,  
AUTOMATED PRODUCTION, ADAPTIVE CONTROL, INFORMATION  
MODELING, COORDINATION AND PLANNING METHOD.**

The purpose of the work - modeling the functioning of the training system of mobile transport robot in automated production.

The object of study – control systems for mobile transport works in automated production.

The subject of research – methods of intellectualization of transport mobile robot management.

Modeling of functioning of transport mobile robot in automated production and organization of tactical and technical planning of information and motor actions are executed.

The generalized architecture of transport mobile robot and the general principle of construction of its model are resulted. Planning algorithms are considered. Information models of multicomponent transport mobile robot are presented. The choice of the method of organizing the control of the robotic system is made. The method of coordination and planning of intellectualization of management of transport robot as a part of automated production is resulted.

The scientific novelty of the work is that the further development of the system of adaptive control of robots, using the method of control intellectualization, which allowed to create information modeling of the training system of mobile transport robot in automated production.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	8
Вступ... ..	9
1 Аналіз технічного завдання .....	12
1.1 Найменування, область застосування, мета побудови підсистеми навчання .....	12
1.2 Функціональні вимоги до підсистеми навчання .....	13
1.3 Висновки до 1 розділу .....	14
2 Моделювання функціонування транспортного мобільного робота .....	15
2.1 Узагальнена архітектура транспортного мобільного робота .....	15
2.2 Загальний принцип побудови моделі .....	22
2.3 Алгоритми планування .....	28
2.4 Висновки до 2 розділу .....	43
3 Створення алгоритму управління транспортним мобільним роботом ...	44
3.1 Передумови створення алгоритму .....	44
3.2 Багатокомпонентність транспортного мобільного робота .....	45
3.3 Вибір способу організації управління системою.....	47
3.4 Архітектура підсистеми багатокомпонентної робототехнічної системи .....	49
3.5 Висновки до 3 розділу .....	50
4 Моделювання системи навчання транспортного мобільного робота ...	51
4.1 Координація виконання інформаційно-рухових дій .....	51
4.2 Планування виконання інформаційно-рухових дій .....	56
4.3 Функціонування підсистеми підтримки і прийняття рішень .....	58
4.4 Рішення оберненої задачі кінематики .....	61
4.5 Програмна реалізація підсистеми підтримки і прийняття рішень ...	64
4.6 Висновки до 4 розділу .....	72
5 Охорона праці .....	73

5.1 Промислова безпека та аналіз умов праці на робочому місці .....	73
5.2 Виробнича санітарія в лабораторії .....	74
5.3 Висновки до 5 розділу.....	76
Висновки.....	77
Перелік джерел посилання .....	78
Додаток А Фрагмент програми .....	81
Додаток Б Демонстраційний матеріал .....	82

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСК – абсолютній системі координат;

БД – база даних;

БРС – багатокomпонентна робототехнічна система;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

ІРД – інформаційно-рухова дія;

КМП – коридор мінімального потенціалу;

ПК – персональний комп'ютер;

ПР – промисловий робот;

РМС – розподілена мобільна система;

ТМР – транспортний мобільний робот;

ТП – технологічний процес;

ЦСУ – центральна система управління.

## ВСТУП

В останні роки відбувається роботизація буквально всіх сфер людської діяльності. Діапазон застосування робототехніки надзвичайно широкий.

Роботи витісняють людину на виробництві. Повна автоматизація багатьох процесів зводить участь людей у виробництві до прийняття важливих рішень і усунення виникаючих несправностей устаткування.

Для цієї мети роботів оснащують виконавчими механізмами, такими як ноги, колеса, шарніри і схвати. Виконавчі механізми мають єдине призначення – докладати фізичні зусилля до середовища. Крім того, роботів оснащують датчиками, які дозволяють їм сприймати дані про навколишнє середовище. У сучасних роботах застосовуються різні види датчиків, включаючи ті, що призначені для вимірювання характеристик середовища (наприклад, відеокамери і ультразвукові дальноміри), і ті, які вимірюють характеристики руху робота (наприклад, гіроскопи і акселерометри).

Більшість сучасних роботів можна віднести до однієї з трьох основних категорій. Роботи-маніпулятори або роботи-руки, фізично прив'язані до свого робочого місця, наприклад, на заводському складальному конвеєрі або на борту Міжнародної космічної станції. Під час руху маніпулятора у ньому зазвичай бере участь увесь ланцюг керованих шарнірів, що дозволяє таким роботам встановлювати свої виконавчі механізми в будь-яку позицію в межах свого робочого простору. Маніпулятори відносяться до типу найбільш поширених промислових роботів, оскільки в усьому світі встановлено понад мільйон таких пристроїв. Деякі мобільні маніпулятори використовуються в лікарнях в якості асистентів хірургів. Без робототехнічних маніпуляторів в наші дні не зможуть продовжувати свою виробничу діяльність більшість

автомобільних заводів, а деякі маніпулятори використовувалися навіть для створення оригінальних художніх творів.

До другої категорії відносяться транспортні мобільні роботи (ТМР). Роботи такого типу пересуваються в межах свого середовища з використанням коліс, ніг або аналогічних механізмів. Вони знайшли своє застосування під час доставки обідів у лікарнях, під час переміщення контейнерів у вантажних доках, а також під час виконання аналогічних задач. До третього типу відносяться гібридні пристрої – ТМР, обладнані маніпуляторами. Гібридні роботи здатні поширити дію своїх виконавчих елементів на більш широку робочу область у порівнянні з прикріпленими до одного місця маніпуляторами, але змушені виконувати поставлені перед ними задачі з великими зусиллями, оскільки не мають такої жорсткої опори, яку надає вузол кріплення маніпулятора.

До сфери робототехніки можна також віднести протезні пристрої (штучні кінцівки, вушні і очні протези для людей), інтелектуальні системи життєзабезпечення (наприклад, цілі будинки, обладнані датчиками і виконавчими механізмами), а також багатофункціональні системи, в яких робототехнічні дії здійснюються з використанням цілого скупчення невеликих роботів, які об'єднують свої зусилля.

Реальним роботам зазвичай доводиться діяти в умовах середи, яка є частково спостерігаємою, стохастичною, динамічною і безперервною. Деякі варіанти місця існування роботів (але не всі) є також послідовними і мультиагентними. Часткова спостережність і стохастичність обумовлені тим, що роботу доводиться стикатися з великим, складним світом. Робот не може зазирнути за кожен кут, а команди на виконання рухів здійснюються не з повною визначеністю через прослизання привідних механізмів, тертя і т.д. Крім того, реальний світ завзято відмовляється діяти швидше, ніж в реальному часі. У моделюємому середовищі надається можливість використовувати прості алгоритми (такі як алгоритм  $Q$ -навчання), щоб визначити за допомогою навчання необхідні параметри,

здійснюючи мільйони спроб протягом всього лише декількох годин процесорного часу, а в реальному середовищі для виконання всіх цих спроб можуть знадобитися роки. Крім того, реальні аварії, на відміну від модельованих, дійсно завдають шкоди. В застосовуванні на практиці робототехнічні системи необхідно вносити апріорні знання про робота, про його фізичне середовище і задачі, які він повинен виконувати для того, щоб швидко пройти навчання і діяти безпечно.

У промисловій сфері застосування ТМР та інших при реалізації різних технологічних процесів (ТП) є невід'ємною частиною автоматизації сучасних виробництв. Засоби зчутливлення і інтелектуалізації застосовуються також для узгодженості з навколишнім середовищем, що є особливо актуальним при використанні роботів в складі гнучкого інтегрованого виробництва. Таким чином тема атестаційної роботи є актуальною, а її метою є моделювання функціонування системи навчання транспортного мобільного робота в автоматизованому виробництві.

Для досягнення поставленої мети потрібно:

- провести аналіз технічного завдання та вимог до розроблювальної системи навчання;
- виробити інформаційне моделювання функціонування ТМР;
- дослідити управління ТМР на основі кінцево-автоматного підходу;
- дослідити метод координації і планування.

Пояснювальна записка атестаційної роботи відповідає вимогам, що викладені у методичних вказівках з «Розробки і оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітні програми: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» [1] та ДСТУ 3008:2015 «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення» [2].

# 1 АНАЛІЗ НЕДОЛІКІВ СУЧАСНИХ СИСТЕМ НАВЧАННЯ ТА ВИМОГИ ДО РОЗРОБЛЮВАНОЇ СИСТЕМИ

## 1.1 Найменування, область застосування, мета побудови системи

Система, що розробляється та має назву «Система навчання транспортного мобільного робота в автоматизованому виробництві», призначена для планування цілеспрямованих дій інтелектуального ТМР в апріорно невизначеним середовищем функціонування. Метою розробки є інформаційне моделювання функціонування системи навчання транспортного мобільного робота в автоматизованому виробництві на інформаційному рівні організації тактико-технічного планування інформаційно-рухових дій (ІРД) ТМР.

Під час розробки схожа модель системи була відсутня, і планування не проводилося. Дослідження ґрунтувались лише на жорсткому алгоритмі відпрацювання заданої траєкторії переміщення виконавчих підсистем робота. Відсутність зворотного зв'язку з виконаними операціями вказує на малу гнучкість системи в цілому, відповідно значно скорочуються можливості застосування ТМР у реальних умовах автоматизованого виробництва. Безпосередня експлуатація такої системи виявляє проблеми, які стосуються:

- необхідності створення гнучкої розподіленої структури гнучких виробничих модулів;
- вирішення задач тимчасового узгодження роботи декількох роботів під час виконання єдиної задачі;
- необхідності зміни програми керування під час переходів до нових не структурованих виробничих ділянок, на яких можна позначити складність введення траєкторії відпрацювання технологічної операції ТМР.

Головний недолік – жорстка вимога до точності завдання еталонної траєкторії, порушення якої в процесі роботи спричиняє порушення виконання всього ТП. Крім того, таку ситуацію складно скоригувати автоматично, тому необхідно інтелектуально планувати дії.

## 1.2 Функціональні вимоги до системи навчання

Система навчання повинна забезпечувати такі функціональні можливості:

- планування траєкторії пересування ТМР в апріорно невизначеному динамічному середовищі функціонування в межах автоматизованого виробництва;
- репрезентація об'єктів середовища (за умови протидії) та функціонально-виконавчих вузлів ТМР з використанням нечіткого конфігураційного простору;
- формування траєкторії пересування з фіксованим рівнем довіри;
- оновлення мапи середовища під час дослідження нових ділянок середовища функціонування;
- режим роботи розробника в реальному часі;
- модульність та нарощуваність системи навчання.

Під час наповнення бази знань вибір загальних характеристик (код, найменування тощо) відомих об'єктів визначається оператором. Параметри обходу об'єктів вводяться безпосередньо з систем управління ТМР і записуються як додаткові до основних. Зміна траєкторії в базі знань об'єктів відбувається тільки за допомогою самої системи, оператор не має можливості змінювати ці параметри самостійно.

Система навчання забезпечує оновлення методів прийняття рішень за рахунок об'єктно-орієнтованої структури інформаційно-моделюючого комплексу, тобто відбувається перекомпонування без зміни базових зв'язків між об'єктами моделювання.

### 1.3 Висновки до 1 розділу

Задачі, які вирішуються системою навчання, полягають в моделюванні процесу синтезу інформації про допустимі ІРД, що залежить від поточного стану ТМР та конфігурації об'єктів протидії в середовищі функціонування, а також об'єктів, що підлягають обробці – планування виконуваних інформаційно-рухових дій ТМР. З усіх задач, які вирішуються подібною системою, можна визначити такі дії:

- надавати комплексну інформацію про робочий простір робота в рамках автоматизованого виробництва, при цьому обов'язково необхідно використовувати операції картографування, а також позначати умовні плани переміщень робота;

- автоматично узгоджувати конфігурації ТМР та об'єктів середовища;

- контролювати план дій в залежності від динамічних змін в конфігурації об'єктів середовища;

- виконувати процедуру побудови умовних інформаційних рухових траєкторій пересування ТМР;

- забезпечувати постійний зворотній зв'язок плану дій з потоком сенсорних даних;

- синтезувати карти середовища, що досліджується.

## 2 МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

### 2.1 Узагальнена архітектура транспортного мобільного робота

З огляду на процес побудови узагальненої архітектури ТМР, доцільно скористатися поняттям інтелектуального агента. Зазначимо, що конструкція компонентів архітектури агентів (датчиків, механізмів виконання і процесорів) вже визначена, і потрібно лише розробити програми агента. Але успіхи в створенні реальних роботів також залежать від того, наскільки вдало будуть спроектовані датчики і механізми виконання, які необхідні для реалізації поставленої задачі [5, 6].

Датчики – це інтерфейс між роботами і середовищем, в якому вони взаємодіють, що забезпечує передачу результатів сприйняття. Пасивні датчики, зокрема, відеокамери, виконують своє першопочаткове призначення – функції спостерігача за середовищем, а саме перехоплюють сигнали, які створюються іншими джерелами сигналів в середовищі. Активні датчики, наприклад, локатори, навпаки, посилають енергію в середовище. Принцип їхньої роботи полягає в тому, що частина енергії, яка випромінюється, відображається, а потім знову надходить до датчика. Зазвичай завдяки активним датчикам можна отримати більше інформації, ніж від пасивних, але за рахунок збільшення споживання енергії від джерела живлення; ще одним їхнім недоліком можна вважати інтерференцію, що виникає при одночасному використанні багаточисельних активних датчиків. У цілому всі датчики (як активні, так і пасивні) можна поділити на три типи: перші – реєструють відстань до об'єктів, другі – формують зображення середовища, треті – контролюють характеристики самого робота [7].

Для більшої частини ТМР використовуються далекоміри, що являють собою датчики, які вимірюють відстань до найближчих об'єктів. Найчастіше застосовують такий тип датчиків, як звуковий локатор, іншими словами, ультразвуковий вимірювальний перетворювач. Звукові локатори випромінюють спрямовані звукові хвилі, які відображаються від об'єктів, в результаті чого частина цього звуку знову надходить до датчика. При цьому час надходження та інтенсивність такого зворотного сигналу дають можливість визначити відстань до найближчих об'єктів. Для автономних підводних апаратів зазвичай використовується технологія підводних гідролокаторів, в свою чергу на землі звукові локатори використовуються для запобігання зіткнень лише в найближчих околицях, оскільки ці датчики мають обмежений кутовий дозвіл. До числа інших пристроїв, які альтернативні до звукових локаторів, належать радари (найчастіше застосовуються на повітряних судах) і лазери. Принцип роботи лазерного далекоміра показаний на рис. 2.1.

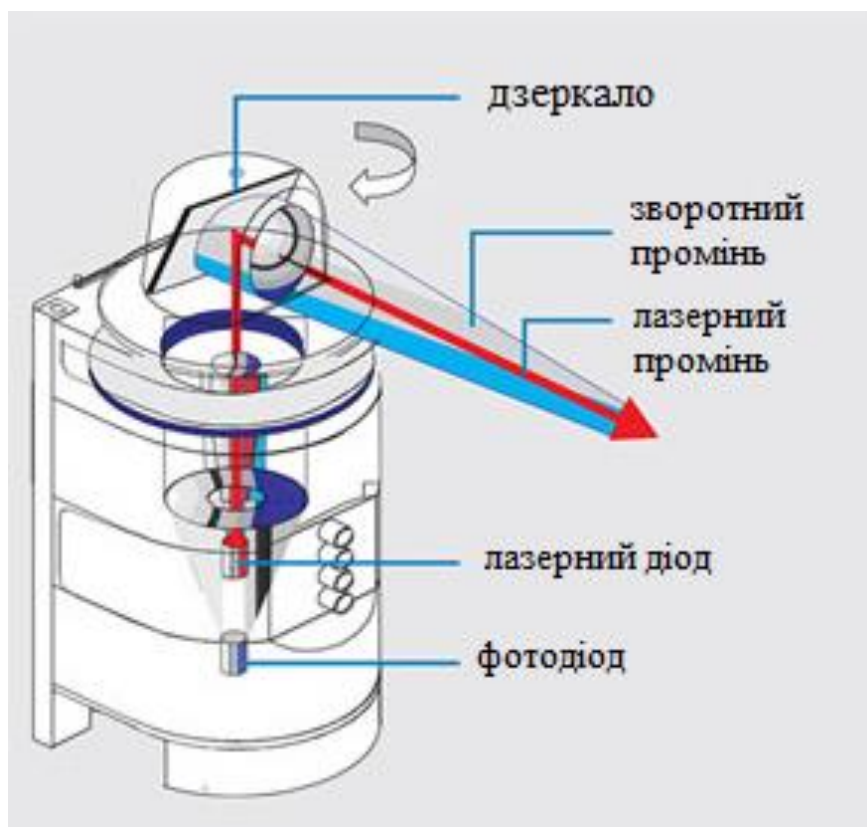


Рисунок 2.1 – Лазерний далекомір [8]

Крім того, існують датчики відстані, призначені для вимірювання дуже короткої або дуже довгої відстані. Зокрема, датчиками вимірювання короткої відстані можна назвати тактильні датчики, наприклад, контактні вусики, контактні панелі та сенсорні покриття. На іншому кінці спектру знаходиться глобальна система позиціонування – Global Positioning System (GPS), яка вимірює відстань до супутників, які випромінюють імпульсні сигнали. Нині на орбіті знаходяться понад два десятки супутників, кожен з яких передає сигнали на двох різних частотах. Приймачі GPS визначають відстань до цих супутників за допомогою аналізу значення фазових зрушень. Потім приймачі GPS виконують триангуляцію сигналів від декількох супутників та визначають свої абсолютні координати на Землі з точністю до кількох метрів. У диференціальних системах GPS застосовується другий наземний приймач з відомими координатами, завдяки чому при ідеальних умовах забезпечується точність вимірювання координат до міліметра. На превеликий жаль, системи GPS не працюють всередині приміщення або під водою [3].

Ще одним важливим класом датчиків є датчики зображення - відеокамери. Вони дозволяють як отримувати зображення навколишнього середовища, моделювати і визначати характеристики середовища з використанням методів системи технічного зору. Для робототехніки особливо важливе значення має стереоскопічний зір, який дозволяє отримувати інформацію про глибину. Однак, майбутнє цього напрямку знаходиться під загрозою, оскільки вдало здійснюється розробка нових активних технологій отримання просторових зображень.

Третім важливим класом вважають пропріорецептивні датчики. Вони інформують робота про його ж стан. Для вимірювання точної конфігурації робототехнічного шарніру, що приводить його у дію, електродвигуни часто доповнюються дешифраторами кута повороту валу. Вони дають змогу визначати навіть невеликі приращення кута повороту

валу електродвигуна. У маніпуляторах роботів дешифратори кута повороту валу здатні надати точну інформацію за будь-який період часу.

У мобільних роботів дешифратори кута повороту валу, які передають дані щодо кількості обертів колеса, можуть використовуватися для одометрії, а саме вимірювання пройденої відстані. У зв'язку з тим, що колеса часто зсуваються і прослизують, результати одометра є точними тільки для дуже короткої відстані. Іншою причиною помилок під час визначення позиції є зовнішні сили, наприклад, течії, які можуть впливати на автономні підводні апарати і вітри, що збивають з курсу автоматичні повітряні транспортні засоби. Щоб покращити цю ситуацію, необхідно використовувати інерційні датчики, зокрема, гіроскопи, але навіть вони застосовуються без інших додаткових коштів, не дозволяють виключити неминуче накопичення похибки визначення положення робота [7].

Крім того, важливі аспекти стану робота контролюються за допомогою датчиків зусиль і датчиків обертаючого моменту. Ці датчики є обов'язковими у використанні, якщо роботи призначені для роботи з крихкими об'єктами або об'єктами, точна форма і місцезнаходження яких невідомі. Наприклад, робототехнічний маніпулятор з максимальним зусиллям стискання в одну тонну закручує в патрон електричну лампочку. При цьому дуже важко запобігти ситуації, якщо робот докладе занадто велике зусилля і розчавить лампочку. Але датчики зусилля дозволяють роботу відчувати, наскільки міцно він тримає лампочку, а датчики обертаючого моменту – визначити, з яким зусиллям він її повертає. Датчики дають змогу вимірювати зусилля у трьох напрямках перенесення і трьох напрямках обертання.

Механізми виконання – це ті засоби, за допомогою яких роботи пересуваються і змінюють форму свого тіла. Щоб представити основні особливості конструкції виконавчих механізмів, спочатку необхідно розглянути абстрактні поняття руху і форми, за допомогою концепції ступеня свободи. Як ступінь свободи можна розглядати кожний

незалежний напрямок, в якому можуть пересуватися як робот, так й один з його виконавчих механізмів. Наприклад, тверdotілий робот, який вільно рухається, на кшталт автономного підводного апарата, має шість ступенів свободи; три з них ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), визначають положення робота в просторі, а решта – його кутову орієнтацію по трьох осях обертання: хитання, поворот і нахил. Ці шість ступенів свободи визначають кінематичний стан або позу робота. Динамічний стан робота включає по одному додатковому вимірюванню для швидкості зміни кожного кінематичного виміру [9].

На рис. 2.2 зображений Стенфордський маніпулятор. Це один з перших маніпуляторів робота, в якому використовуються п'ять поворотних шарнірів (R) і одне призматичне зчленування (P), що дозволяє отримати в цілому шість ступенів свободи.

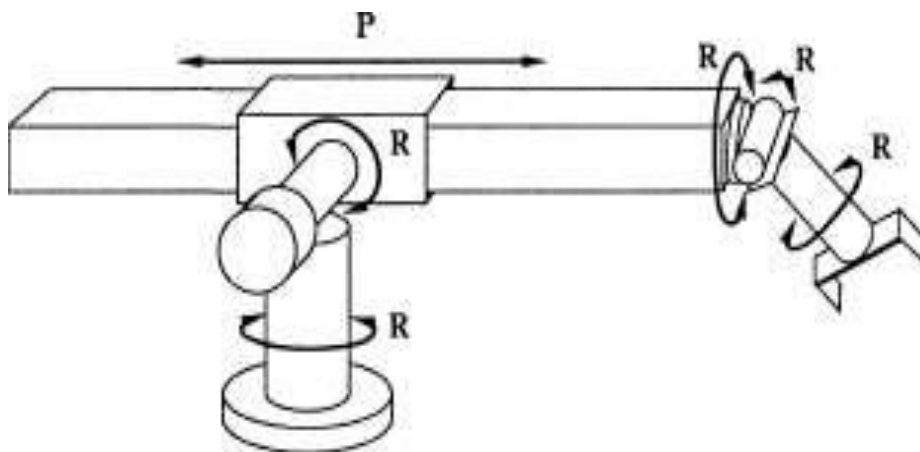


Рисунок 2.2 – Стенфордський маніпулятор [10]

Нетверdotілі роботи мають додаткові ступені свободи всередині самих себе. Наприклад, в руці людини лікоть має один ступінь свободи (може згинатися в одному напрямку), а кисть має три ступені свободи (може рухатися вгору і вниз, з одного боку в інший, а також обертатись). Кожен з шарнірів робота теж має 1, 2 або 3 ступеня свободи. Для переміщення будь-якого об'єкта, на кшталт руки, в конкретну точку з конкретною орієнтацією необхідно мати шість ступенів свободи. Щоб

довести, що рука людини в цілому має більше шести ступенів свободи, необхідно провести простий експеримент: покласти кисть на стіл і переконатись в тому, що ви ще маєте можливість повертати руку в лікті, при цьому положення кисті на столі не змінюється. Отже, маніпуляторами з більшою кількістю ступенів свободи, ніж потрібно для перекладу кінцевого виконавчого механізму в цільове положення, простіше керувати в порівнянні з роботами, які мають лише мінімальну кількість ступенів свободи.

У ТМР кількість ступенів свободи не обов'язково повинна співпадати з кількістю елементів, які приводяться в дію. Наприклад, звичайний автомобіль може пересуватися вперед або назад, а також повертатися, що відповідає двом ступеням свободи. А ось кінематична конфігурація автомобіля є тривимірною – на відкритій плоскій поверхні можна легко перевести автомобіль у будь-яку точку  $(x, y)$ , з будь-якою орієнтацією. Таким чином, автомобіль має три ефективні ступеня свободи, але керованих ступеня свободи – два. У свою чергу, якщо робот має більше ефективних ступенів свободи, ніж керованих ступенів свободи, то він називається неголономним, а якщо ці два значення співпадають, то – голономним. Останні простіші в управлінні (було б набагато легше припаркувати автомобіль, здатний рухатися не тільки вперед і назад, але і в боки), проте голономні роботи є також механічно складнішими. Більшість маніпуляторів роботів є голономними, а більшість ТМР – неголономними [11].

У ТМР застосовується ціла низка механізмів для переміщення в просторі, зокрема, колеса, гусениці та ноги. Роботи з диференціальним приводом обладнані з двох боків незалежно керуючими колесами (або гусеницями, як в армійському танку). Якщо колеса, що знаходяться по обидва боки, обертаються з однаковою швидкістю, то робот рухається прямо. Якщо ж вони обертаються в протилежних напрямках, то робот повертається на місці. Альтернативний варіант полягає у використанні

синхронного приводу, в якому кожне колесо може обертатися і повертатися навколо вертикальної осі. Застосування такої системи приводу цілком могло б призвести до хаотичного переміщення, якби не використовувалося умови, що всі пари коліс повертаються в одному напрямку і обертаються з однаковою швидкістю. Диференційний і синхронний приводи – неголономні У деяких більш дорогих роботах використовуються голономні приводи, які зазвичай складаються з трьох або більшої кількості коліс, які здатні повертатися і обертатися незалежно одне від одного [11].

Ноги, на відміну від коліс, можуть використовуватися для пересування не по плоскій поверхні, а по місцевості, для якої характерний дуже грубий рельєф. Проте, на плоских поверхнях ноги як засіб пересування значно поступаються колесам, до того ж саме завдання створення для них механічної конструкції дуже складне. Дослідники в галузі робототехніки намагалися розробити конструкції з різною кількістю ніг, починаючи від однієї ноги і закінчуючи буквально десятками. Були розроблені роботи, обладнані ногами для ходіння, бігу і навіть стрибків.

У ТМР інших типів для пересування використовуються інші, надзвичайно різноманітні механізми. У літальних апаратах зазвичай застосовуються турбіни або пропелери. Роботизовані дирижаблі тримаються в повітрі за допомогою теплових ефектів. В автономних підводних транспортних засобах часто використовуються пристрої, які можуть підрулювати, тобто подібні до тих, які встановлюються на підводних човнах.

Для якісного функціонування робота недостатньо, щоб він був обладнаний лише датчиками і виконавчими механізмами. Повноцінний робот повинен також мати джерело енергії для приводу своїх виконавчих механізмів. Для приведення в дію маніпулятора, а також для пересування найчастіше використовуються електродвигуни; певну область застосування мають також пневматичні приводи, в яких використовується

стиснений газ, і гідравлічні приводи, в яких використовується рідина під високим тиском (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Транспортний мобільний робот OMRON [12]

Крім того, більшість роботів мають засоби цифрового зв'язку на кшталт бездротової мережі. Врешті-решт, робот повинен мати жорсткий корпус, на який можна було б навесити всі ці пристрої, а також мати при собі паяльник, на той випадок, якщо його обладнання перестане працювати.

Отже, основна задача для побудови інтелектуальних робототехнічних систем – це інформаційне моделювання ТМР як деякого активного агента середовища. У свою чергу, однією із задач проектування раціонального агента середовища стає завдання розробки моделі планування його інформаційно-рухових дій.

## 2.2 Загальний принцип побудови моделі

Традиційна модель організації моделювання полягає в тому, що інформаційними потоками обмінюються дослідник-проектувальник. В імітаційній моделі за результатами моделювання зворотний зв'язок робить зовнішній по відношенню до системи імітаційного моделювання ланцюг –

людина, яка може долучати допоміжні засоби і методи програмного забезпечення.

При цьому досліднику-проектувальнику належить функція перетворення інформації, яка полягає в інтерпретації результатів і прийнятті рішень щодо управління експериментами, а також узагальненні інформації для бази знань транспортного мобільного робота. Автоматизація управління експериментами передбачає при цьому створення замкненого програмно реалізованого контуру управління імітаційної моделі в рамках коштів зовнішнього програмного забезпечення (рис. 2.4).

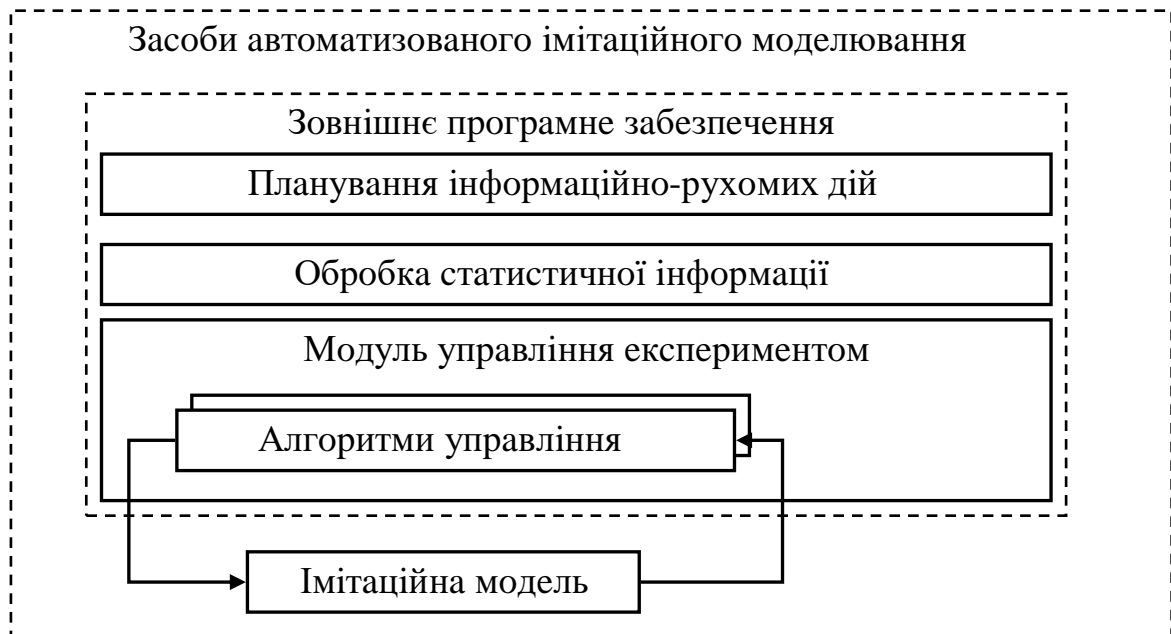


Рисунок 2.4 – Структура інформаційно-управляючої моделі

Цілеспрямовані серії експериментів відповідають заданій меті функціонування робота, враховуючи обмеження конфігураційних параметрів, організують модулі, які спеціально належать до складу зовнішнього програмного забезпечення. У загальному вигляді ці модулі повинні задавати набори початкових даних, ініціювати прогони моделі в цілому, обробляти результати і приймати рішення про подальший розвиток

експериментів у відповідності реалізованого алгоритмом управління моделюванням [3]. Такий алгоритм, спрямовуючи експерименти, в галузі припустимих значень параметрів здійснює пошук такого їх об'єднання, який би забезпечував оптимальність заданого показника якості, тобто по суті вирішує завдання оптимізації:

$$f(\bar{x}) \rightarrow \max_{\bar{x} \in X}, \quad (2.1)$$

де  $f$  – цільова функція, алгоритмічна імітаційна модель;

$\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – вектор параметрів об'єкта моделювання;

$X$  – множина припустимих значень вхідних параметрів.

Отже, сукупність алгоритмічних і програмних засобів, що відповідає за процес автоматизованого моделювання, утворює систему автоматизації імітаційного моделювання (САІМ). При цьому користувач не вводить кожен набір початкових даних для чергового прогону імітаційної моделі, а лише вказує мету або критерії та область варіювання параметрів, водночас пошук допустимих рішень задач моделювання виконується за допомогою САІМ автоматично. Таким чином, останню можна визначити як інтелектуальну систему моделювання. Наприклад, функції САІМ в контурі управління гнучкої виробничої системи в цілому полягають в аналізі альтернативних варіантів поведінки роботів після прийняття того чи іншого можливого рішення щодо диспетчеризації і оперативного планування інформаційно-рухових дій і тощо.

Про ефективність реалізації цих функцій можна говорити в результаті заміни жорсткої логіки керування інтелектуальним роботом. Це передбачає використання в окремих ситуаціях заданих і фіксованих евристик гнучкого і динамічного механізму, який забезпечує прийняття рішень не тільки на основі такого аналізу поточного стану робота, але й враховуючи перспективи його розвитку. В результаті відбувається

об'єднання високої вірогідності результатів і можливості автоматичного прийняття рішень в режимі «жорсткого» реального часу [3].

Проблему автоматизації управління експериментами і синтезу знань, а також побудову бази знань можна представити як логічну структуру поетапного вирішення окремих задач ТМР (рис. 2.5).

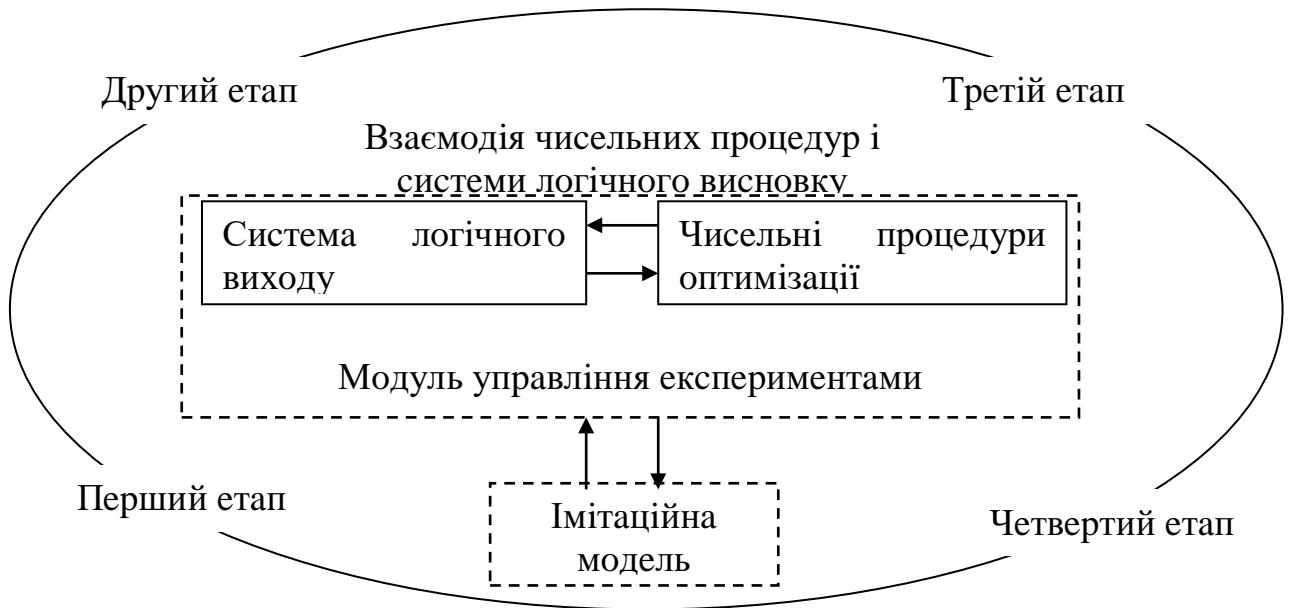


Рисунок 2.5 – Автоматизоване моделювання інтелектуального об'єкта

На першому етапі автоматизації управління експериментами необхідно вирішити дві задачі: виконати структурно-алгоритмічну побудову, власне модуля управління; сформулювати змістовні основи і формальні вимоги до організації інформаційного обміну з імітаційною моделлю.

Для вирішення задачі структурно-алгоритмічної побудови модуля управління експериментами і синтезу системи знань потрібно визначити склад і структуру модуля (розробити умови взаємодії його компонентів і

положення в загальній структурі система автоматизації імітаційного моделювання) [11].

Під час виконання серії прогонів імітаційної моделі відбувається цілеспрямоване варіювання значення параметрів. Таке варіювання може впливати на значення цільової функції як за допомогою прямого впливу на показники функціонування об'єкта моделювання, так і за допомогою інших елементів об'єкта (робота), пов'язаних між собою. В результаті змінюються не лише вартісні, але й інші показники. Крім того, на значення деяких параметрів можна накласти обмеження, зокрема частину їх можна фіксувати, тобто задати декларативно. Це може відобразитися під час формування наборів початкових даних та ініціалізації початкових станів процесу моделювання системи знань.

Якщо розглядати імітаційну модель як засіб цілеспрямованого перетворення інформації відповідно до деякої системи приписів, то мова може йти про алгоритм імітаційного моделювання. Це значить, що формальну інтерпретацію розглянутих вимог можемо записати так:

$$\left. \begin{array}{l} S \in Q; \\ S \in C; \end{array} \right\} \quad (2.2)$$

де  $S$  – вхідне слово алгоритму імітаційного моделювання;

$Q$  – множина допустимих наборів значень параметрів робота;

$C$  – область визначення алгоритму імітаційного моделювання.

Вхідне слово  $S$  задає набір початкових даних для конкретного набору даних, тобто  $S = (i, \xi_j, \dots, \xi_z)$ , де кожна величина  $\xi_j$  відповідає деякому значенню певного параметра об'єкта моделювання. Область  $C$  визначається програмною реалізацією алгоритму імітаційного моделювання, яка формується за допомогою множини  $D_{ex}$  наборів вхідного алфавіту. Всі величини  $\xi_j$ , мають допустиму реалізацію об'єкта моделювання  $U$ .

Таким чином, вирази (2.2) відповідно визначають умови погодження  $S$  з імітаційної моделлю і з алгоритмом. Розробка апарату формального аналізу полягає в несуперечності змін семантично взаємопов'язаних параметрів для забезпечення варіювання, що не порушує умов (2.2) і не призводить до змін фіксованих параметрів.

На другому етапі необхідно провести автоматизацію управління експериментами і побудови системи знань, а саме:

- розробити принципи взаємодії системи логічного висновку і чисельних оптимізаційних процедур;
- обрати (розробити) апарат реалізації логічного висновку в комбінованих алгоритмах управління експериментами;
- розробити на основі запропонованого апарату ефективних алгоритмів висновків з урахуванням специфіки взаємодії з чисельними процедурами оптимізації.

На третьому етапі необхідно вирішити задачу розробки оптимізаційних процедур, які необхідні для планування екстремальних дій [1]. При цьому питання розробки алгоритмічного забезпечення пов'язано із специфічними аспектами моделювання об'єкта:

- автоматизацією управління експериментами в умовах лінгвістичної невизначеності параметрів, наприклад, «ступінь подоби/відзнаки ...» не має природного чисельного вимірювання;
- організацією екстремальних експериментів в задачах однопараметричної оптимізації при істотно нерівномірному розташуванні точок в середині інтервалу, наприклад, унімодальна функція відгуку, а також фіксування відповідних станів в моделі системи знань;
- скороченням часу пошуку при значній тривалості прогону імітаційної моделі (за умови багатоітераційних алгоритмів пошуку), повному переборі варіантів тощо.

### 2.3 Алгоритми планування

Метод потенціалів у задачі вибору шляху для ТМР був запропонований А.К. Платоновим в 1970 році та використовується й нині.

Необхідно розглянути випадок, коли робот обладнаний досить точною навігаційною системою, щоб її помилками можна було знехтувати, а системі управління відомі як координати робота і вимірювального пристрою, так і орієнтація сектора огляду, а також напрямок вимірювань в деякій абсолютній системі координат (АСК). Робот у всіх випадках є точкою з запропонованим вектором орієнтації [13].

Розглянемо метод детальніше. Припустимо, що мета має деякий позитивний заряд, а перешкоди заряджені негативно, крім того, місця розташування мети і перешкод фіксовані. Також є деяка негативно заряджена точка, яка може переміщатися. Помістимо її в вихідну точку. Під дією сил рухома точка буде притягатися до мети і відштовхуватися від перешкод, причому закони руху можуть задаватися, в принципі, різними способами. При цьому логічно буде припустити, що при деяких обмеженнях на структуру місцевості і закони руху точки ця точка досягне мети.

Залежно від способу, який необхідний для завдання функцій, можна отримати траси з обходом перешкод з тим або іншим ступенем «ризик» (величини наближення до перешкод). Алгоритми, які розглянуто нижче, гарантують від зациклення в разі, коли контури перешкод опуклі. Також метод можна застосувати для випадку, коли перешкоди розбиваються на групи, опуклі оболонки яких не перетинаються.

У даній атестаційній роботі автор досліджує модифікації алгоритму. При цьому розглядає напрямки модифікації вихідного алгоритму.

Досліджено статична і показова функції відштовхування від перешкод і вплив їх на результат шляху. Для оцінки ефективності шляху

використовувалася функція відхилення вектору напрямку руху від вектору напрямку на ціль.

Проаналізовано можливості використання методу потенціалів для управління розподіленою мобільною системою (РМС) за допомогою п'яти способів організації такого руху:

- рух за схемою «ланцюг». Коли сила тяжіння мети діє на «лідера», і кожен ТМР «притягується» до того, який йде попереду;
- рух типу «гонка за лідером». Усі елементи РМС «притягуються» до «лідера», який, в свою чергу, «притягується» до цільової точки;
- рух типу «розбіжності». Коли на ТМ елементи розташовані компактною групою або ланцюгом, у цей час починає діяти сила відштовхування від «лідера». ТМР «розбігаються», досліджуючи кожен свою ділянку;
- рух типу «сходження». У цьому випадку «лідер» збирає всі елементи РМС в компактну групу;
- організація руху типу «вільний пошук». У цьому випадку відсутня сила тяжіння до мети, і кожен елемент РМС рухається в вільному від перешкод напрямку.

Перші два режими використовуються для організації пересування РМС, а три – для інформаційного дослідження середовища.

На початковому етапі досліджень інтелектуального переміщення ТМР розглядалися перешкоди у вигляді кіл. Сила тяжіння до мети покладалася постійною за модулем і спрямованою до точки мети. Сила відштовхування від  $i$ -ї перешкоди  $f_i$  залежала від аргументу  $R_i/r_i$ , де  $R_i$  – радіус  $i$ -ої окружності,  $r_i$  – відстань від центру  $i$ -ої окружності до точки яка рухається.  $f_i$  вважалася спрямованою від центру кола.

Траєкторія (локомоція) виходила в результаті інтегрування рівнянь руху другого порядку, оскільки прискорення, що діяло на рухомих точках, визначалося сумою зазначених сил. У ході досліджень було з'ясовано, що інерційність, закладена в зазначену модель, призводить до того, що

траєкторія руху стає малоприйнятною (перешкода «відкидає» рухому точку дуже сильно і траєкторія виходить надто «порізаною» [11]. З метою позбавлення від цього недоліку та роботою над придатним методом для випадку апроксимації контурів перешкод іншими способами, було зроблено наступне. По-перше, використали рівняння руху першого порядку (тобто діючі сили визначають швидкість, іншими словами, аналог простого градієнтного спуску). По-друге, силу відштовхування визначили аргументом, рівним відстані до перешкоди. При цьому форму контуру перешкоди обрали довільну, а для наведеного вище прикладу це різниця  $r_i - R_i$ . Цю силу скоригували в бік від найближчої точки перешкоди. В ході досліджень було визнано раціональним у разі наявності декількох перешкод використати функції від зазначеного аргументу  $x$  типу  $x-k$  або  $e^{-cx}$ , які швидко зменшуються з відстанню. При цьому коефіцієнти  $k$  і  $c$  можуть бути змінними параметрами.

Слід зазначити, що під час варіювання параметрів  $k$  і  $c$  при визначенні сил відштовхування, можна отримувати траєкторії для руху декількох ТМР. За умови введення в цьому процесі запізнювання можна отримати режим «слідування один за одним» [13].

Іноді середовище, в якому розташовано багато перешкод, «добре організовано», наприклад, перешкоди розбиваються на групи, опуклі оболонки яких не присікаються. В цьому випадку сила відштовхування може обчислюватися відразу для всієї групи.

Отже, метод потенціалів дозволяє будувати «розмиті» моделі середовища і отримувати рішення без урахування непотрібних подробиць.

Під час аналізу різноманітних зарубіжних робіт за методом потенціалів, ми спостерігали два цікавих напрямки.

Перший – спроба відповісти на питання: чи можна ефективно задавати силове поле так, щоб були відсутні стійкі точки рівноваги в принципі. Досить очевидно, що в загальному випадку відповідь на це питання позитивна. Дійсно, функція потенціалу в точці  $x$ , дорівнює

мінімальній довжині допустимого шляху від  $x$  до  $g$  – точці цілі, задає таке поле. Однак в загальному випадку цю функцію вважати вельми непросто. В результаті було запропоновано підхід до цієї проблеми, який хоча і відрізнявся оригінальністю, в результаті виявився, навряд чи набагато простіше, ніж спосіб, зазначеного вище. Спочатку було розглянуто «Сферичний світ». Для площини це окружності-перешкоди, оточені колом-рамкою. У цьому світі результуюча сила визначається не як сума сил, що діють від різних перешкод, а як твір таких сил. Ці два положення дозволяють уникнути наявності точок рівноваги силового поля, що зафіксовано теоретично.

Наступним кроком була побудова послідовності дифкомп'ютерорфізмів. Спочатку між «сферичним світом» і «зоряним світом», в якому перешкоди представляли багатокутники особливого виду. Потім відбувався перехід від «зоряного світу» до все більш і більш «загальним світам» [13]. При цьому дифкомп'ютерорфізми зберігали «безособість», що утворювалася під час поетапних переходів від «сферичного світу» силових полів. Однак зауважимо, що демонстровані ілюстрації подібних полів для більш загальних постановок, ніж «сферичний світ», дозволяють стверджувати, що для них дуже характерні «яружні ефекти». Отже, якщо є фіксовані значення кроку, тоді в кращому випадку можливі ефекти типу «інформаційного коливання», а також зациклення в помилковому екстремумі. Ймовірно, саме тому автори не демонструють побудову траєкторій руху, а тільки зображення ліній рівня.

Другий напрямок бере початок від робіт дослідників Оксфордського університету. Науковці представляли ТМР не крапкою, а відрізком чи прямокутником. Це дозволяє розраховувати не тільки результуючу силу, яка діє на ТМР, а й момент сил, тобто управляти орієнтацією.

Нижче наведемо деякі результати дослідження алгоритмів, заснованих на методі потенціалів, які раніше не публікувалися

Залежність траєкторії від показника  $k$  і кроку  $s$  для функції сили відштовхування  $F$  виду  $(R/r)^k$  для випадку кола:

(a):  $k=16, s=0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ ;

(b):  $k=4, 8, 12, 16, s=0.05$ ;

(c):  $F$  виду  $\exp[-(1 - A \cdot r/R)^2]$ ,  $A=1.5$ ;

(d):  $F$  та сама, що і для (a),  $k=12, s=0.05, 0.1, 0.2, 0.3$ .

Критичне ставлення кроку до радіусу обхідної окружності для появи інформаційного брязкоту 0,1 для степеневі функції і 0,3 для експоненти.

За схожим принципом було досліджено вплив інформаційного брязкоту для плавного контуру (коло радіуса 1) за час обходу методом потенціалів.

Розглянемо «метод потенційного наведення», який передбачає оснащення робота далекомірами, що визначають відстань до об'єктів у робочій зоні. Розрахунок напрямку пересування робота здійснюється безперервно на підставі результатів складання трьох векторів з урахуванням відповідних вагових функцій: перший вектор характеризує напрямок, при якому в найкращій мірі проглядається цільова точка; другий вектор характеризує напрямок пересування без зіткнень з перешкодами, і третій – вектор відповідного напрямку руху робота до теперішнього часу. При цьому система керування роботом забезпечує раціональний обхід невідомих перешкод. Керування здійснюється з використанням карти за алгоритмом побудови в квазіреальному часі квазіоптимальної (за відстаню) траєкторії. У свою чергу, ультразвуковий далекомір, встановлений на роботі, забезпечує виявлення перешкод, причому процедура планування траєкторії знову повторюється для внесення необхідних корекцій [1].

Архітектура систем навігації реального часу, що використовується також для обходу перешкод ТМР, вирізняє:

– види і технології відповідних датчиків (сенсорів);

– різні моделі поведінки за допомогою сенсорно-керованих алгоритмів;

– метод штучного потенційного поля – алгоритм реального часу, розроблений спеціально для навігації ТМР в процесі руху.

У системі, яку розглядали вище, дані інфрачервоних датчиків створюють образ середовища в деякій ТМР, відповідно до якого потім будується траєкторія руху. Відповідно виникають суворі обмеження на швидкість руху ТМР, пов'язані зі швидкістю отримання і обробки даних, швидкістю роботи навігаційного алгоритму і часом реакції керуючої системи ТМР на зміну обстановки.

У даній реалізації методу потенціалів ТМР являє собою точку початку відліку в полярних координатах, з якої сенсором, який обертається, здійснюється безперервне циклічне сканування місцевості з сектором огляду  $360^\circ$  [13].

Якщо кут  $\gamma$  – кутовий крок сканування,  $d_i$  – результат  $i$ -ї (відносно поточного напрямку руху ТМР) виміру дальності від ТМР до перешкоди, то у відповідність до кожного  $d_i$  ставиться вектор сили  $f_i$ , який вираховується за допомогою рівнянь для штучного потенційного поля:

$$|f_i| = \frac{A}{|d_i|^2}; \quad \arg(f_i) = \arg(d_i) + \pi, \quad (2.3)$$

де  $A$  – фіксована константа.

Після огляду всього сектору ( $360^\circ$ ) необхідно визначити нові компоненти вектора швидкості  $V_x$  та  $V_y$ :

$$\begin{aligned} V_y &= \sum_{i=0}^{2\pi/\gamma} \beta^{(2(2\pi/\gamma)-i)} f_i \cos(i\gamma), \\ V_x &= \sum_{i=0}^{2\pi/\gamma} \beta^{(2(2\pi/\gamma)-i)} f_i \sin(i\gamma), \end{aligned} \quad (2.4)$$

де  $\beta$  – з фізичної точки зору,  $\epsilon$  ваговий множник. Він використовується для того, щоб на компоненти швидкості більший вплив надавали сили, що діють з фронту ТМР, ніж позаду.

Стверджується, що в загальному випадку  $\beta$  є функція  $\gamma$  та  $d_i$ :

$$\beta = \beta\left(\sum_{i=0}^{2\pi/\gamma} d_i \cos(i\gamma)\right), \quad (2.5)$$

при цьому  $\beta$  перераховується кожного разу, якщо знаходиться новий вектор швидкості [13].

Розглянемо алгоритм планування руху випуклого багатокутного об'єкта в середовищі із багатокутними перешкодами. У даному випадку представлена евристика, що базується на розгляді моментів. Це дозволяє розширити алгоритм і ввести в розгляд додатковий ступінь свободи ТМР – кут повороту. Також представлені результати побудови траси для ТМР, що рухається по коридору.

У роботі використано наступну термінологію. Нехай робоча область простору  $W$ , в якій діє ТМР, є підмножиною  $\mathcal{M}$ . Нехай  $O \subset W$  – це безліч перешкод в робочій області, тоді вільним простором в  $W$  буде множина  $F = W \setminus O$ ; задача побудови шляху МР в такому випадку є завдання знаходження набору точок в  $F$ , що визначають траєкторію руху ТМР з початкової точки в точку цільову.

Спочатку розглянемо простий алгоритм, в якому багатокутний об'єкт  $M$ , що має два ступені свободи, переміщається в робочому просторі  $W$ , в якому присутня кінцева множина перешкод  $O$ . Поточне положення об'єкта  $M$  задається вектором  $x$ , початкове положення – вектором  $x_s$ , а цільова точка – вектором  $x_g$ . Тоді траса будуватиметься за таким алгоритмом:

```

x ← xs
repeat
     $\Delta_{min} \leftarrow \min (\Delta(M,o)) \forall o \in O$ 
     $F_{repulse} \leftarrow \Delta_{min} \cdot 1 / |\Delta|^2$ 
     $F_{attract} \leftarrow xg - x$ 
     $F_{res} \leftarrow F_{attract} + a \cdot F_{repulse}$ 
    x ← x + Fres
until ( x = xg ) or ( |Fres| = 0 ).

```

Отже,  $\Delta$  – вектор, який доставляє мінімальну відстань між  $M$  і перешкодою  $o \in O$ . Константа  $a$  керує впливом перешкоди на  $M$  в залежності від відстані. Під час використання подібної потенційної функції не відбувається зіткнень з перешкодами, однак, алгоритм може зациклюватися в разі досягнення ТМР локального мінімуму в потенційному полі [14]. Щоб боротися з цим явищем, можна застосовувати різні методи, зокрема, «бар'єр» з точок високого потенціалу навколо точки локального мінімуму або метод Монте-Карло.

На наступному етапі для об'єкта  $M$  вводиться додатковий ступінь свободи – кут повороту  $\theta$ , початкова конфігурація об'єкта в даному випадку –  $(x_s, \theta_s)$ . Передбачається, що рух відбувається в коридорі мінімального потенціалу (КМП). Головна вісь направлена по дотичній до КМП за умови, що рух орієнтований таким чином, щоб момент обертання ТМР в потенційному полі був мінімальним.

Нехай  $c$  – центр мас  $M$ , а  $P$  – множина векторів, що описують стан деяких контрольних точок, нормально розподілених по межі  $M$  відносно  $c$ . Попередній алгоритм модифікується в такий спосіб:

```

x ← xs
θ ← θs
repeat
    Frepulse ← (0, 0)
    moment ← 0
    for each p ∈ P
        Δmin ← min (Δ(c + p, o)) ∀ o ∈ O
        Frepulse ← Frepulse + Δmin · 1 / |Δ|2
        moment ← moment + (p × Δmin) · k
    endfor
    Fattract ← xg − x
    Fres ← Fattract + a · Frepulse
    x ← x + Fres
    θ ← θ + b × moment
until ( x = xg ) or ( |Fres| = 0 ).

```

Константа  $b$  керує величиною повороту і визначається емпірично, оскільки математичне рішення залежить від багатьох чинників й нетривіальне. Крім того, під час практичної реалізації алгоритму, вибір  $c$  може бути неоднозначним. У наведених прикладах для триколісного ТМР брали середину осі між двома задніми колесами [14].

Розглянемо метод обходу перешкод ТМР, відомий як метод «гістограм векторних полів» (VHF-метод). Він дозволяє виявляти перешкоди і обходити їх під час руху. ТМР, керований даними алгоритмом, маневрує швидко і без зупинок навіть серед великої кількості неупорядкованих перешкод.

Для подання перешкод VHF-метод використовує сітку на двовимірній декартовій площині. Кожному осередку сітки, відповідно, ставиться характерне значення, що представляє рівень «впевненості»

алгоритму в присутності перешкоди в цій комірці. Метод використовує представлення даних у вигляді дворівневої системи:

- на першому рівні – за допомогою декартової сітки  $C$  детально описується середовище, що оточує робота;

- на другому рівні – за даними, що містяться в  $C$ , будується полярна гістограма, навколо центру мас ТМР як набір значень з  $C$ , відповідний деяким фіксованим секторам шириною  $\alpha$  кожен. Кожному сектору  $k$  додається в відповідності величина  $hk$ , яку ще називають полярною щільністю перешкод в напрямку  $k$ .

Вихідними даними алгоритму є сигнали управління ТМР.

Нехай  $C^*$ , що називається активною областю, є область сітки  $C$  розміром  $w_s \times w_s$ , побудована навколо МР; її елементами є активні осередки  $c_{ij}$ . Тоді  $C$  перетворюється в  $H$ : якщо побудувати вектори перешкод, напрямком яких щодо точки поточного становища ТМР визначається як:

$$\beta_{ij} = \arctan \frac{y_i - y_0}{x_i - x_0}, \quad (2.6)$$

а модуль вектора:

$$m_{ij} = (c_{ij}^*)^2 [a - b d_{ij}], \quad (2.7)$$

де  $a, b = const > 0$ ;

$d_{ij}$  – відстань між активною ланкою і ТМР;

$c_{ij}^*$  – середнє значення в активній клітинці  $(i, j)$ ;

$x_0, y_0$  – поточні координати ТМР;

$x_i, y_i$  – координати активної ланки  $(i, j)$ .

Кожному з  $k$  секторів ставиться у відповідність кут з ряду  $0, \alpha, 2\alpha, \dots, 360^\circ - \alpha$  [14]. Тоді між  $k$  і  $c_{ij}^*$  існує таке відношення:

$$k = \alpha \cdot INT(\beta / \alpha). \quad (2.8)$$

Для кожного сектора  $k$   $h_k$  обчислюється:

$$h_k = \sum_{i,j} m_{ij}. \quad (2.9)$$

Отже, кожен з активних осередків знаходиться в одному з секторів. Однак, через дискретності сітки, в результаті такого розподілу осередків можуть виникати «сходинки» в секторах. Це може призвести до помилок у виборі напрямку. Щоб уникнути спотворення результату, використовується для згладження функція :

$$h_k^{\wedge} = \frac{h_{k-l} + 2h_{k-l+1} + \dots + lh_k + \dots + 2h_{k+l-1} + h_{k+l}}{2l+1}, \quad l \in \mathbb{N}. \quad (2.10)$$

Далі необхідно обчислити напрямок руху в полярних координатах,  $\theta_{free}$ , і відповідний йому сектор  $k_{free}$  у  $H$ . Алгоритм вибирає більш «прохідний» напрямок і, разом з тим, як можна більш наближену до поточного напрямку ціль  $\theta_{arg}$ .

У початковій точці швидкість руху ТМР встановлюється максимальною ( $S_{max}$ ), а потім визначається на кожному кроці відповідно до формули:

$$S^{\wedge} = S_{max} (1 - h_c^{\wedge} / h_m), \quad (2.11)$$

де  $h_c^{\wedge}$  – згладжена полярна щільність перешкод в обраному напрямку руху,  
 $h_c^{\wedge} = \min(h_c^{\wedge}, h_m)$ ;

$h_m$  – емпірично встановлена константа.

При цьому відношення (2.11) гарантує  $S' \geq 0$  при  $h_c^{\wedge} \leq h_m$ .

Крім того, необхідно розглянути метод побудови гладких трас руху ТМР, який заснований на фізичній аналогії. Стійке рішення і робота не тільки з двійковими (перешкода або вільний простір), але і з різномірними середовищами, поверхня яких може мати нерівні коефіцієнти тертя або кути нахилу на різних ділянках, – основні переваги.

В основу методу покладено фізичні принципи гідродинаміки. Припустимо, що все середовище заповнено рідиною, то потоки рідини дозволяють дістатися з початкової точки до цільової. У цьому випадку оптимальний шлях – це потік, спрямований уздовж градієнта тиску, в якому досягається стаціонарний рух рідини; локальний мінімум не може бути досягнутий, оскільки у всіх точках потоку задовольняється рівняння Лапласа. Для обліку неоднорідностей середовища вводиться зовнішня сила. Вона враховує силу тертя і вплив прохідних перешкод, тому розглядаються потоки в'язкої рідини [13]. Основним рівнянням руху в'язкої нестисливої рідини є рівняння Нав'є-Стокса:

$$\begin{aligned} \nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} &= \bar{f} - \bar{\nabla} p + \mu \Delta \bar{v}, \\ \bar{\nabla} \bar{v} &= 0, \end{aligned} \quad (2.12)$$

де  $\rho$  – щільність рідини;

$v$  – вектор швидкості руху рідини;

$t$  – час;

$f$  – зовнішня сила;

$p$  – тиск;

$\mu$  – коефіцієнт в'язкості рідини.

Спрощене рівняння виглядає наступним чином:

$$\begin{aligned}\mu\Delta\bar{v}(\bar{x}) &= \bar{\nabla}p(\bar{x}) - \bar{f}(\bar{x}), \\ \bar{\nabla}\bar{v} &= 0.\end{aligned}\tag{2.13}$$

Невідомими тут є вектор швидкості  $v$  і абсолютна координата  $x$ .

Граничні умови:

$$\begin{cases} \bar{v}(\bar{x}_F) = 0, & \bar{x}_F \in \partial\Omega, \\ \frac{\partial p(\bar{x}_F)}{\partial \bar{n}} = 0, & \bar{x}_F \in \partial\Omega, \end{cases}\tag{2.14}$$

де  $\partial\Omega$  – кордони перешкод;

$n$  – зовнішня нормаль до кордону перешкоди.

Початкові умови:

$$\begin{cases} p(\bar{x}_S) = 1, \\ p(\bar{x}_G) = 0, \end{cases}\tag{2.15}$$

де  $x_S$  – початкова точка;

$x_G$  – цільова точка.

Щоб вирішити рівняння в двовимірному просторі методом кінцевих різниць, необхідно представити рівняння в такий спосіб:

$$\begin{cases} 2\mu(v_{x_{i+1,j}} + v_{x_{i,j+1}} + v_{x_{i-1,j}} + v_{x_{i,j-1}} - 4v_{x_{i,j}}) = h(p_{i,j+1} - p_{i,j-1}) - 2hf_{x_{i,j}}, \\ 2\mu(v_{y_{i+1,j}} + v_{y_{i,j+1}} + v_{y_{i-1,j}} + v_{y_{i,j-1}} - 4v_{y_{i,j}}) = h(p_{i+1,j} - p_{i-1,j}) - 2hf_{y_{i,j}}, \\ v_{x_{i,j+1}} - v_{x_{i,j-1}} + v_{y_{i+1,j}} + v_{y_{i-1,j}} = 0, \end{cases}\tag{2.16}$$

де

$$\begin{aligned}\bar{v} &= v_x \bar{x} + v_y \bar{y}, \\ \bar{f} &= f_x \bar{x} + f_y \bar{y}.\end{aligned}\tag{2.17}$$

Якщо число точок сітки  $N$ , то необхідно вирішити розріджену систему з  $3N$  лінійних рівнянь.

В результаті роботи даного алгоритму виявлено безліч так званих «коридорів». Кожен коридор починається в колі стартової точки і закінчується в колі цільової. Дотримання ТМР по осьовій лінії коридору гарантує його безпеку.

Далі необхідно розглядати випадок, коли зовнішня сила не дорівнює нулю, це дозволяє враховувати різномірність середовища [13].

Повна потенційна енергія частинки в потоці:

$$\int_S^G \mu \Delta \bar{v} \cdot \bar{T} = \int_S^G \bar{\nabla} p \cdot \bar{T} = p_G - p_S,\tag{2.18}$$

де  $S$  – початкова точка;

$G$  – цільова точка;

$T$  – вектор, дотичний до траєкторії;

$p_G - p_S$  – різниця тисків в  $x_S$  і  $x_G$ .

Якщо присутня сила тертя  $F$ :

$$\begin{aligned}\int_S^G \mu \Delta \bar{v} \cdot \bar{T} + \int_S^G F \cdot \bar{T} &= \int_S^G \bar{\nabla} p \cdot \bar{T} = p_G - p_S, \\ \int_S^G \mu \Delta \bar{v} \cdot \bar{T} - L \cdot F &= \int_S^G \bar{\nabla} p \cdot \bar{T} = p_G - p_S.\end{aligned}\tag{2.19}$$

Механічна робота сили тертя  $L \cdot F$  залежить від довжини траєкторії  $L$ .

У випадку досить великої величині  $F$ :

$$\int_S^G |\mu \Delta \bar{v} \cdot \bar{T}| \ll L \cdot F, \quad (2.20)$$

всі траєкторії мають обмежену довжину:

$$L \leq L_{\text{lim}} = \frac{P_S - P_G}{F}. \quad (2.21)$$

Практично, установка дуже великої величини  $F$  на межі перешкод еквівалентна умові  $v = 0$ . Якщо використати  $F = \text{const}$  довжина потоків може бути обмеженою, тому, за умови збільшення величини  $F$ , можна домогтися відсіювання шляхів більшої довжини, залишаючи лише шляхи, у яких довжини близькі до оптимальних [13].

Для тестів, які проводились за даним методом, використовувався 4-х колісний ТМР на полігоні 60 м  $\times$  100 м з перешкодами. Зовнішня сила  $f$  задавалася у виді:

$$f = mg(\sin \theta + K_f \cos \theta), \quad (2.22)$$

де  $m$  – маса ТМР;

$\theta$  – кут нахилу ділянки поверхні в напрямку руху;

$K_f$  – коефіцієнт тертя між колесами і поверхнею.

Слід також врахувати напрямок, пов'язаний з досить складним за своєю структурою завданням потенційної функції, яка не має локальних мінімумів. Однак завдання подібної потенційної функції може виявитися дуже складним.

## 2.4 Висновки до 2 розділу

У ході дослідження було зроблено моделювання функціонування транспортного мобільного робота. Крім того, розроблено модель планування раціонального агента середовища інформаційно-рухових дій.

### 3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

#### 3.1 Передумови створення алгоритму

Останнім часом розподілені системи, зокрема, робототехнічні, привертають дедалі більшу увагу дослідників. Однією з причин такої уваги є той факт, що системи такого класу все частіше використовуються як для промислових, так і непромислових додатків: дійсно, об'єднання паралельно функціонуючих підсистем дозволяє виконувати такі завдання, які не під силу кожному з компонентів складної системи [15]. На рис. 3.1 наведено приклад такої багатокомпонентної системи, в якій наявні ТМР різного призначення: навантажувачі, дослідники тощо.

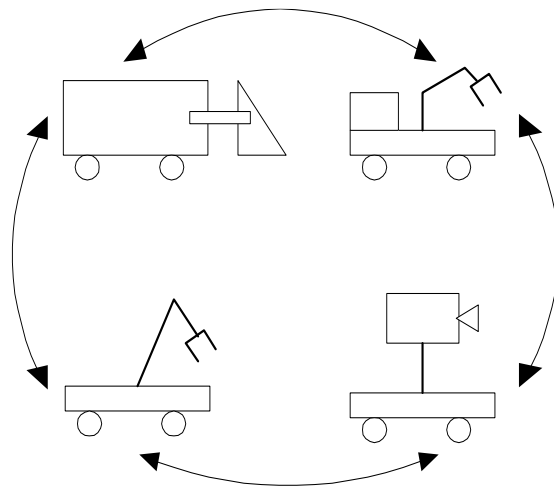


Рисунок 3.1 – Багатокомпонентна робототехнічна система

З іншого боку, керування системами такого класу є нетривіальним завданням: якщо керування кожною з підсистем, складових складної системи, завдання, взагалі кажучи, вирішене (наприклад, переклад

маніпулятора з точки в точку за заданою траєкторією), то керування узгодженою поведінкою групи роботів, об'єднаних спільною метою, є складною проблемою.

Підкреслимо, що завдання керування може значно ускладнюватися, якщо частина підсистем переслідує конфліктуючі цілі.

Пропонуємо підхід до вирішення завдання координації взаємодії підсистем, складових складної системи, що базується на описі всіх підсистем як кінцевих автоматів і використовує мережу спеціальним чином побудованих автоматів для координації роботи підсистем в процесі виконання попередньо сформованого завдання. Крім того, запропоновано способи планування поведінки складної системи із використанням методів штучного інтелекту.

### 3.2 Багатокомпонентність транспортного мобільного робота

Багатокомпонентна система – це система, до складу якої входить множина підсистем, об'єднаних спільним завданням.

Розглянемо це визначення більш детально.

Нехай завдання  $T$  буде представлено як множина підзавдань  $t_i$ :

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}. \quad (3.1)$$

Введемо відношення слідування  $F$  на  $T$ , де  $t_i F t_j$  означає, що завдання  $t_i$  може бути виконано тільки за умови виконання  $t_j$ . Якщо така структуризація завдання  $T$  проведена, тоді можна побудувати орієнтований граф, який описує  $T$ :

$$G = (T, A), \quad (3.2)$$

де  $T = \{t_i\}$  – множина вершин графа  $G$ ;

$A = \{a_i\} \in T \times T$  – множина спрямованих дуг, при цьому дуга  $a \in A$  з'єднує  $t_i$  з  $t_j$  лише у випадку, коли  $t_i F t_j$ .

Нехай система  $S$  складається з підсистем  $s_i$  (далі – локальними системами або терміналами):

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}, \quad (3.3)$$

при цьому  $T_i \subset T$  – завдання, що виконується системою  $s_i$ .

Тоді систему:

$$CS = (S, T), \quad (3.4)$$

будемо називати  $T$  – складною системою (далі – складною системою), якщо виконані такі умови:

$$\begin{aligned} C1: \bigcup_{i=1}^N T_i &= T; \\ C2: G. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Умови  $C_1, C_2$  можна інтерпретувати в так:

–  $C_1$ : складна система, що складається з набору підсистем, які в змозі виконати завдання  $T$ ;

–  $C_2$ : дії всіх підсистем, що входять до складу складної системи, повинні координуватися в процесі виконання завдання. У даному випадку координація представлена обмінами даними (або командами) між підсистемами [15].

Якщо одна з підсистем  $s_i \in S$  є роботом, то така складна система називається багатокомпонентною робототехнічною системою (БРС).

### 3.3 Вибір способу організації управління робототехнічною системою

З'ясуємо спочатку таке питання: «Що ми розуміємо під управлінням БРС?» Кожна з підсистем  $S_i$ , що входить до складу БРС, має власну систему керування, здатну забезпечити виконання всіх функцій, властивих цій підсистемі. Однак, для розглянутого класу систем виникає необхідність взаємодії в процесі виконання завдання, поставленні задачі формування для підсистеми саме того завдання, виконання якого диктується обстановкою, що склалася. Таким чином, завдання керування розподіленими системами полягає в плануванні дій підсистем до початку виконання і подальшої координації в процесі виконання.

Організація процедури планування та координації надзвичайно важлива, оскільки надає істотний вплив на методи керування, що використовуються.

Метод централізованого керування організації передбачає наявність центральної системи керування. Ця система планує дії всіх підсистем, а потім координує їх взаємодію в процесі виконання (рис. 3.2) відповідно до попередньо розробленого плану.

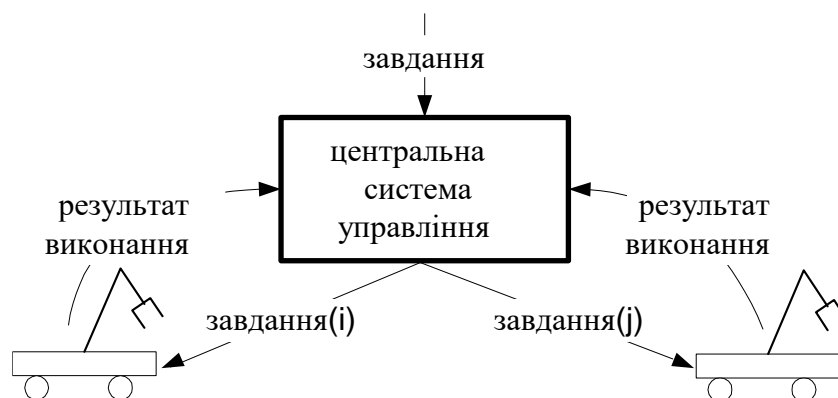


Рисунок 3.2 – Структура ЦСУ

Центральна система управління (ЦСУ) передає підсистемі завдання, виконання якого не вимагає будь-якої координації між підсистемами. Потім результат виконання надходить до ЦСУ. З огляду на отриманий результат ЦСУ посилає підсистемі наступне завдання, а далі процес повторюється. Зауважимо, що фізично ЦСУ може бути реалізована або як окремий пристрій, або на базі системи управління однієї з компонент БРС.

Центральна система при такому розподіленому керуванні – відсутня, а процеси планування завдань і координація в процесі виконання реалізуються шляхом обміну повідомленнями між підсистемами (рис. 3.3).

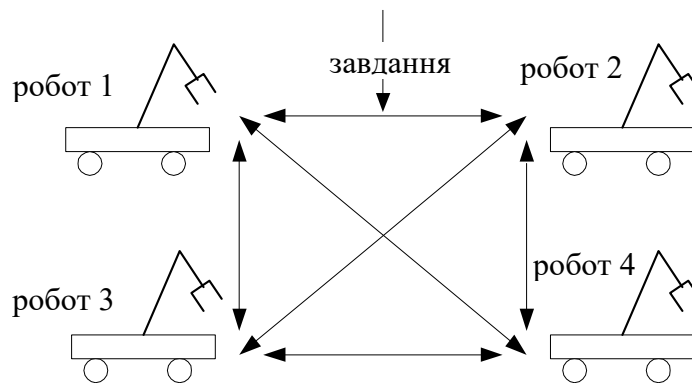


Рисунок 3.3 – Розподілене управління

На етапі планування відбувається переговорний процес, в результаті якого узгоджується план виконання завдання. Реалізація цього плану відбувається на етапі виконання і полягає у виконанні підзавдань і обміні результатами їх виконання. Іншими словами, така організація не може бути управлінням розподіленої системи, оскільки, на відміну від централізованої організації, відсутній явно виражений носій управління, що забезпечує необхідну поведінку системи: всі підсистеми є рівноправними як на етапі планування, так на етапі виконання.

Таким чином, централізоване управління реалізує ієрархічний спосіб організації системи, тому що управління є багаторівневим з явним

підпорядкуванням нижніх рівнів (локальних систем управління) верхнім (центральної системи управління). Всі обміни повідомлень між підсистемами відбуваються не безпосередньо, а через верхній рівень. Розподілене управління реалізує гетерархічний спосіб організації, в якому всі компоненти системи рівноправні і процес планування здійснюється паралельно всіма підсистемами [16].

### 3.4 Архітектура підсистеми багатокomпонентної робототехнічної системи

Стисло розглянемо архітектуру підсистем БРС.

Архітектура кожного компонента БРС обумовлена таким набором функцій, які вона має виконувати:

–  $F_1$  – можливість обмінюватися даними або з центральною системою управління (для централізованого способу управління), або з локальними підсистемами (для розподіленого способу);

–  $F_2$  – забезпечення процесу прийняття рішення або планування (для децентралізованого управління);

–  $F_3$  – забезпечення координації з іншими підсистемами на етапі виконання спланованого завдання;

–  $F_4$  – виконання відповідних підзавдань, які сформовані на етапі планування.

Функція  $F_1$  є чисто технічною, а її реалізація полягає в підтримці відповідних мережевих протоколів. Забезпечення функції  $F_2$  полягає у вимозі існування в підсистемі бази знань для прийняття рішень. Функція  $F_3$  вимагає наявності механізму, який приводить в дію виконання системою відповідних підзавдань за сигналами, що надходять від інших підсистем. При цьому ці сигнали не повинні вимагати перепланування завдання в цілому (наприклад, неуспіх при виконанні підзавдання однією з

підсистем). Нижнім рівнем локальної системи управління і апаратними засобами підсистем забезпечується виконання функції  $F_4$ .

Якщо локальна система є складною, то процес виконання підзавдання також може включати в себе етапи планування та координації виконання. Наприклад, для ТМР, в якому є шасі, маніпулятор і система технічного зору, підзавдання в формі «перемістити об'єкт  $A$  в позицію  $B$ » може бути розплановано таким чином:  $t_1$  – маніпулятор, прибрати;  $t_2$  – TV, знайти  $A$ ;  $t_3$  – маніпулятор, змінити схват;  $t_4$  – маніпулятор, взяти  $A$ ;  $t_5$  – маніпулятор, покласти в  $B$ ; з відповідною координацією між підсистемами «маніпулятор» і «TV» в процесі виконання.

Отже, підсистема повинна включати принаймні 4 компоненти, різних за функціями(рис. 3.4): комунікатор ( $F_1$ ); планувальник ( $F_2$ ); координатор ( $F_3$ ); виконавець ( $F_4$ ).

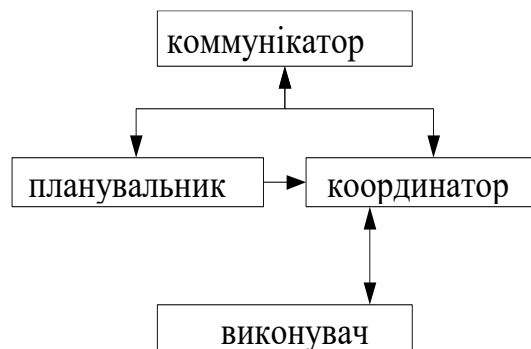


Рисунок 3.4 – Архітектура підсистеми

### 3.5 Висновки до 3 розділу

У даній роботі було запропоновано підхід до вирішення завдання координації взаємодії підсистем, а також способи планування поведінки складної системи із використанням методів штучного інтелекту.

Обрано спосіб організації управління робототехнічною системою.

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ НАВЧАННЯ ТРАНСПОРТНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА

### 4.1 Координація виконання інформаційно-рухових дій

Використаємо підхід, який подає цей рівень системи управління як мережу кінцевих автоматів, побудованих спеціальним чином.

Мережевим автоматом  $NA$  з  $p$  входами і  $q$  виходами назвемо наступний кортеж:

$$NA = \langle I, O, U, X, Z, f, h \rangle, \quad (4.1)$$

де  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_p\}$  – множина входів;

$O = \{o_1, o_2, \dots, o_q\}$  – множина виходів;

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$  – вхідний алфавіт;

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  – множина станів;

$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$  – вихідний алфавіт;

$f: X \times V \rightarrow X$  – однокрокова перехідна функція, де  $V \subset U \times I$ ;

$h: X \times V \rightarrow W$  – вихідна функція, де  $W \subset Z \times O$ .

Елементи множин  $V$  і  $W$  називатимемо узагальненими вхідними та вихідними алфавітами.

Додатково введемо спеціальний символ  $\varepsilon$ , який є елементом і вхідного і вихідного алфавітів. Цей символ умовно назвемо «порожнім». Він завжди присутній на виділеному вході автомата. Якщо в описі переходу з деякого стану присутній вхідний символ  $\varepsilon$ , тоді здійснюється відповідний перехід [17]. Поява символу  $\varepsilon$  в вихідному каналі означає, що на вихід нічого не надходить. Зауважимо, що автомат, який ми отримали в результаті, не є автоматом Мілі, оскільки він не зберігає довжину відображення.

При зображенні графа мережевого автомата ми будемо використовувати наступну нотацію: через  $i.u$  будемо позначати символ вхідного алфавіту  $u \in U$ , що прийшов через вхідний канал  $i \in I$ ; через  $z.o$  будемо позначати символ вихідного алфавіту  $z \in Z$ , що надійшов у вихідний канал  $o \in O$ .

У процесі дослідження з'являється поняття мережі автоматів як набору автоматів, об'єднаних своїми входами і виходами і взаємодіючих шляхом передачі/прийому символів своїх вихідних/вхідних алфавітів.

Назвемо мережею автоматів  $L$  зв'язний мультиграф

$$L = (E, C), \quad (4.2)$$

де  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  – множина вершин графа;

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$  – множина спрямованих дуг,  $c_i = (e_j, e_k)$ .

Таким чином, вершина графа інтерпретується як мережевий автомат, а дуга – як канал зв'язку між автоматами, який використовується для обміну елементами вхідних/вихідних алфавітів.

Робота мережі полягає в паралельному функціонуванні всіх складових її автоматів. В свою чергу, поведінка кожного з автоматів визначається його поточним станом, а також станом вхідних каналів [17].

Нехай тепер  $L = (E, C)$  – мережа автоматів, а розподілена система нехай складається з підсистем, кожна з яких описується кінцевим автоматом, так що  $M = \{M_i\}$  – множина моделей підсистем.

Тоді, якщо  $M \subset E$ , то:

$$L_c = \{E_c, C_c\}, \quad (4.3)$$

де  $E_c$  – структура керування для розподіленої системи, що представлена моделями  $\{M_i\}$ , дорівнює  $E/M$ .

Отже, структура керування, за умови з'єднання з реальними підсистемами, забезпечує деяку поведінку підсистем, залежну від топології структури керування і атрибутів мережевих автоматів, що входять до її складу.

Наведемо простий приклад. Нехай два робота  $Rb_1$  і  $Rb_2$  перекладають деталі з накопичувача  $S$  на два конвеєра  $C_1$  і  $C_2$  (рис. 4.1).

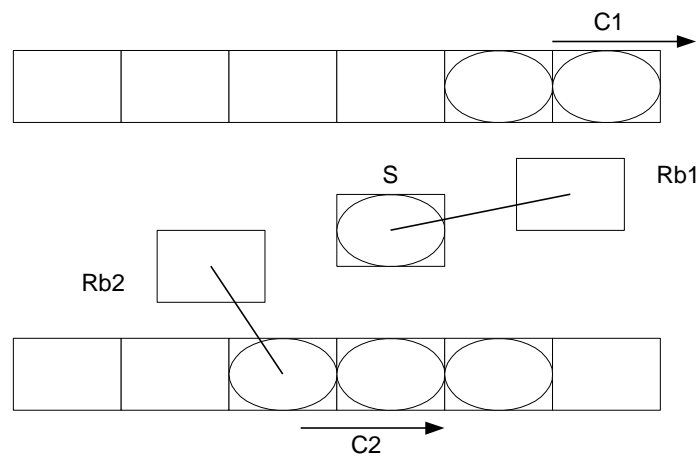


Рисунок 4.1 – Проста БРС

Відповідно до вищезазначеного позначимо роботів  $Rb_1$ ,  $Rb_2$  як кінцеві автомати:

$$Rb_i = (I_i, O_i, U_i, X_i, Z_i, f_i, h_i), i=1,2, \quad (4.4)$$

з наступними атрибутами:

$$I_i = \{i_0\}; O_i = \{i_0\}; U_i = \{g\}; x_i = \{0, 1, 2\}; Z_i = \{y, Y\}, i = 1,2. \quad (4.5)$$

Функції  $f_i$  і  $h_i$  задаються діаграмою, що представлена на рисунку 4.2. Кожен з роботів  $Rb_i$  реагує лише на одну команду « $g$ », в результаті якої він переміщається до накопичувача  $S$ , захоплює деталь, переносить і встановлює її на конвеєр  $C_i$ . Сигнали « $y$ » і « $Y$ » на виході робота з'являються тоді, коли він покидає небезпечну зону і завершує виконання одного циклу відповідно. Побудуємо структуру керування у вигляді трьох автоматів, два з яких ( $Reg_1$  і  $Reg_2$ ) є логічними регуляторами роботів, а третій ( $Re_s$ ) забезпечує стеження за ресурсом.

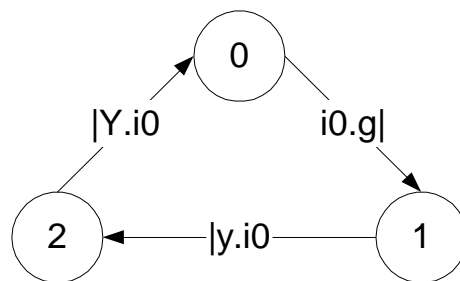
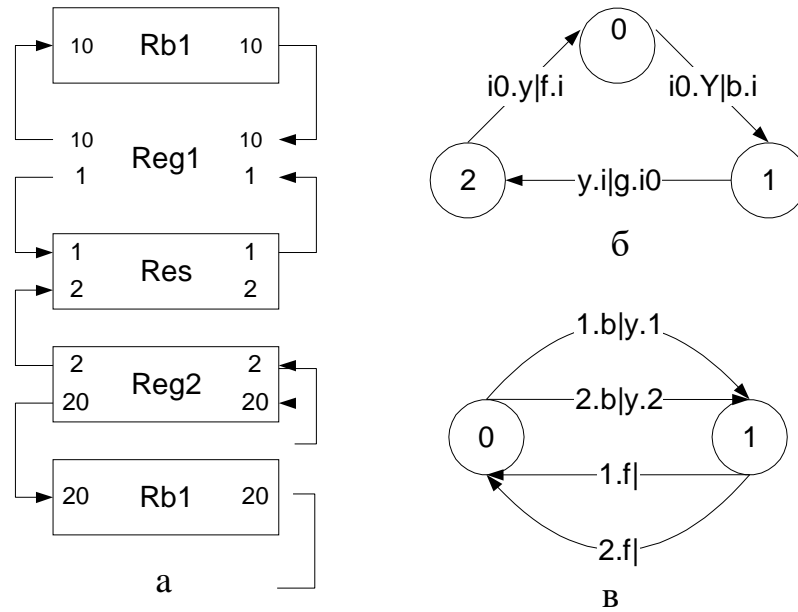


Рисунок 4.2 – Модель робота  $Rb_i$

На рисунку 4.3 представлена топологія структури керування, а також діаграми всіх автоматів, які входять до її складу. Структура функціонує за таким принципом: регулятор кожного робота надсилає запит на заняття небезпечної зони автомату-ресурсу. Якщо зона вільна, то цей запит задовольняється, небезпечна зона переходить в стан «зайнято» і регулятор посилає команду роботу почати транспортну операцію. Коли робот вийде з небезпечної зони, він інформує про це регулятор, який повинен перевести небезпечну зону в стан «вільно» і чекати закінчення виконання операції. Потім цикл повторюється.



а – топологія; б – діаграма регуляторів;  
в – діаграма автомата, що стежить за ресурсом

Рисунок 4.3 – Структура управління

Спосіб координації, який було розглянуто вище, є досить ефективним засобом для побудови тільки централізованих систем управління (рис. 4.4). Дійсно, якщо нижній рівень структури управління по суті виступає логічним регулятором і може бути без праці асоційований з локальними системами управління, то верхні рівні обмінюються даними з усіма підсистемами, які беруть участь у виконанні завдання, і тому є фрагментом центральної системи управління [17].

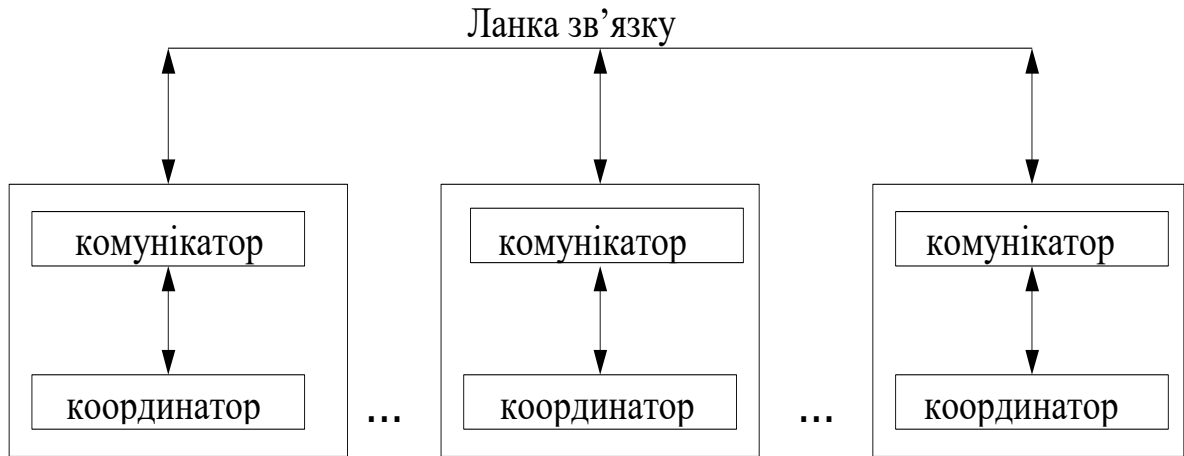


Рисунок 4.4 – Взаємодія підсистем в процесі координації

#### 4.2 Планування виконання інформаційно-рухових дій

Спочатку розглянемо метод планування завдання для централізованої системи, що полягає у виконанні двокрокової процедури.

Крок 1. Знайти послідовність підзавдань, які виконуються кожною з підсистем і сформовані в термінах вхідних алфавітів підсистем, використовуючи методи штучного інтелекту

Крок 2. Перетворити ці послідовності в структуру керування, яка забезпечить координацію виконання сформованого завдання.

Для більш детального дослідження методу вирішення задачі планування будемо використовувати числення предикатів першого порядку. Вхідна інформація, необхідна для вирішення завдання планування, складається з наступних компонент, що містять опис:

- $K_1$  – можливостей кожної з підсистем;
- $K_2$  – початкового стану;
- $K_3$  – завдання;
- $K_4$  – універсальних властивостей.

Компонент  $K_1$  включає набір пропозицій (правил), за допомогою яких кожна підсистема може змінювати стан зовнішнього середовища (переміщення об'єктів, отримання інформації про об'єкти і т.д.).

Особливість саме цього компоненту полягає в наявності сколемовської функції, що належить до однієї з підсистем. Множина  $K_2$  включає факти, що описують початковий стан системи. Компонента  $K_3$  являє собою формулювання завдання. Множина  $K_4$  описує універсальні властивості, які не залежать від підсистем, що входять до складу БРС (це множина може бути порожня) [17]. Елементами всіх множин є правильно побудовані формули в численні предикатів 1-го порядку.

Завдання планування полягає в послідовності операторів, які забезпечують виконання мети. Щоб отримати максимально можливе розпаралелювання процесу виконання, представимо множину  $K_1$  у вигляді:

$$K_1 = \bigcup_{i=1}^N K_{i_1}, K_{i_1} \cap K_{i_2} = \emptyset, i_1 \neq i_2, \quad (4.6)$$

де  $N$  – множина підсистем.

Отже, кожна підмножина  $K_{i_1}$  містить тільки правильні формули, що відображають можливості  $i$ -ої підсистеми. Після здійснення такого розбиття можемо будувати резолюції  $r_{ij}$ , і не-мети з елементами  $K_{i_1}$  настільки довго, наскільки це можливо. Якщо цей процес неможливо продовжити, залишаючись в  $K_{i_1}$  (це означає, що на цьому етапі виконання необхідна взаємодія між підсистемами), необхідно побудувати резолюції з сусідніми підмножинами. Цей процес забезпечить (в разі успіху) отримання послідовності операторів, які належать до кожної з підсистем, а також точок координації їх взаємодії. Отримані результати використовуються для перетворення в систему керування, яка відповідає за забезпечення виконання сформованого плану (рис. 4.5).

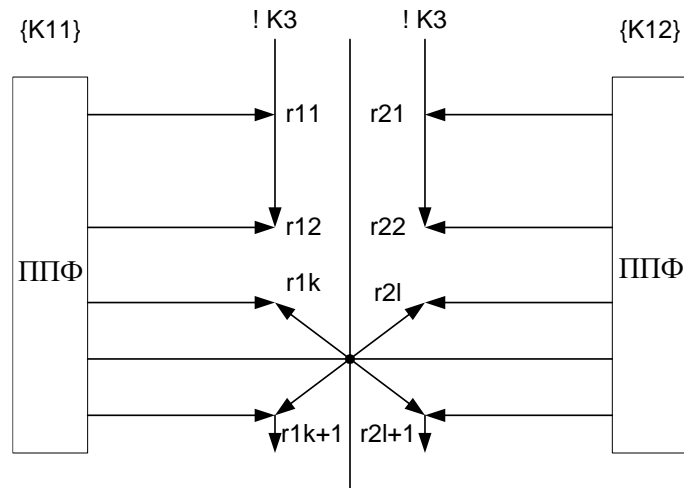


Рисунок 4.5 – Виконання сформованого плану

### 4.3 Функціонування підсистеми підтримки і прийняття рішень

Під час розробки підсистеми підтримки і прийняття рішень як складової частини системи навчання TMP з'являється рішення комплексу програмно-апаратних задач, яке має бути оптимальним, як за часом виконання, так і за необхідними ресурсами для роботи системи. По-перше, розглянемо взаємодію підсистеми з зовнішніми по відношенню до неї функціональними елементами. Таким чином, необхідно визначитися з можливостями, які можна реалізувати на основі цих елементів. Функціональна структура взаємодії підсистеми з системою технічного зору (СТЗ) в процесі роботи представлена на рисунку 4.6.

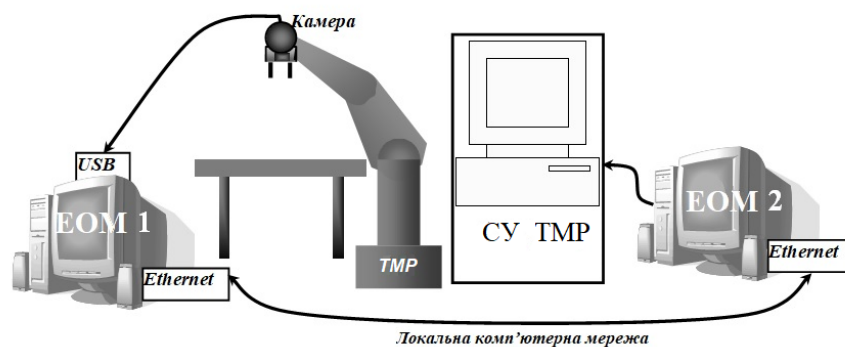


Рисунок 4.6 – Функціональна структура взаємодії підсистеми

У процесі роботи підсистема повинна взаємодіяти з двома елементами: стійка управління TMP – за допомогою послідовного інтерфейсу; з ЕОМ1 (СТЗ) – через локальну комп’ютерну мережу (протокол UDP (User Datagram Protocol)). Програмна частина підсистеми локалізована на ЕОМ2 (рис. 4.6).

На рисунку 4.7 зображена структурна схема розробленої підсистеми.



Рисунок 4.7 – Структурна схема системи

Опис задачі надходить до системи і обробляється декомпозиційним, а потім розбивається на підзадачі. Наприклад, задачу «перемістити об'єкт  $A$  в точку  $B$ » можна розбити на такі підзадачі:

- відкрити схват;
- переміститися в зону об'єкта, так щоб об'єкт опинився в схваті;
- закрити схват;
- переміститися в точку  $B$ ;
- відкрити схват;
- вийти з зони об'єкта.

Далі ці підзадачі надходять до планувальника, який визначає, яким чином краще виконати ту чи іншу підзадачу. Модуль формування програми отримує інформацію від системи технічного зору про об'єкти, що знаходяться в робочому просторі робота. За допомогою модуля роботи з базою даних (БД) відбувається завантаження параметрів, які визначають положення схвату під час захоплення кожного конкретного об'єкта. На основі поточних координат камери та інформації, отриманої від СТЗ та з БД, проводиться розрахунок реальних координат об'єктів. На основі інформації про підзадачі, які були сформовані планувальником, проводиться формування програми керування з використанням координат об'єктів, отриманих в результаті розрахунку.

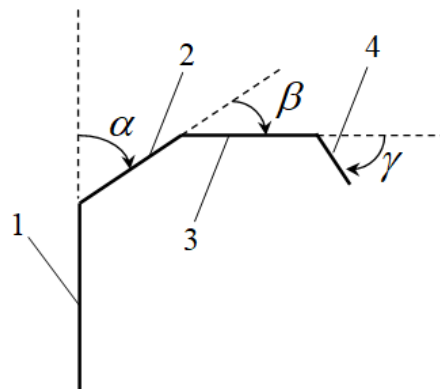
Після закінчення процесу формування програми транслятор вирішує зворотну задачу кінематики для кожного її кроку. Таким чином, програму сформовано в просторі приєднаних координат. Відтрансльована програма надходить на модуль відпрацювання керуючих програм, який спільно з модулем інтерфейсу забезпечує посилення відповідних впливів управління на стійку управління ТМР.

#### 4.4 Рішення оберненої задачі кінематики

Команди управління маніпулятором робота формуються в просторі приєднаних змінних. Для управління положенням і орієнтацією схвата робота координати об'єктів маніпулювання задаються в деякій абсолютній системі координат. Щоб виробляти необхідні операції з об'єктом маніпулювання, необхідно вміти вирішувати зворотну задачу кінематики [13]. Отже, за заданими координатами схвату і відомим параметром його ланок і зчленувань треба вміти визначити приєднані параметри  $q = (q_1, \dots, q_6)^T$  маніпулятора, що забезпечують задане положення схвата.

Початково вирішена зворотна задача кінематики для перших трьох зчленувань маніпулятора у програмі UnitedRobotProject. Програма здатна по заданих декартових координатах точки і кута  $q_5$  визначити необхідні кути  $q_1, q_2, q_3$ . З метою ефективного захоплення об'єктів та їх акуратною установки необхідно, щоб кисть в момент захоплення була повернута перпендикулярно до площини, на якій лежить об'єкт.

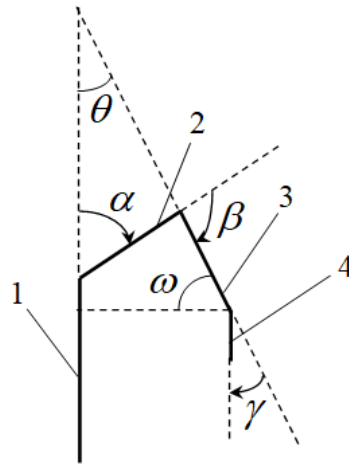
На рисунку 4.8 зображена умовна кінематична схема маніпулятора.



1 – колона; 2 – плече; 3 – лікоть; 4 – кисть

Рисунок 4.8 – Спрощена кінематична схема маніпулятора

Тут  $\alpha$  – кут повороту плеча,  $\beta$  – кут повороту ліктя,  $\gamma$  – кут повороту кисті. Необхідно визначити такі кути  $\alpha, \beta, \gamma$ , щоб кисть була розташована перпендикулярно до робочого столу. По-перше, визначимо, як кут  $\gamma$  залежить від кутів  $\alpha$  та  $\beta$ , за умови, що кисть розташована перпендикулярно. Цей приклад зображено на рисунку 4.9.



1 – колона; 2 – плече; 3 – лікоть; 4 – кисть

Рисунок 4.9 – Кінематична схема маніпулятора для випадку, коли кисть розташована перпендикулярно робочого столу

З рисунка 4.9 бачимо що:

$$\angle \theta = 180 - \angle \alpha - \angle \beta, \quad (4.7)$$

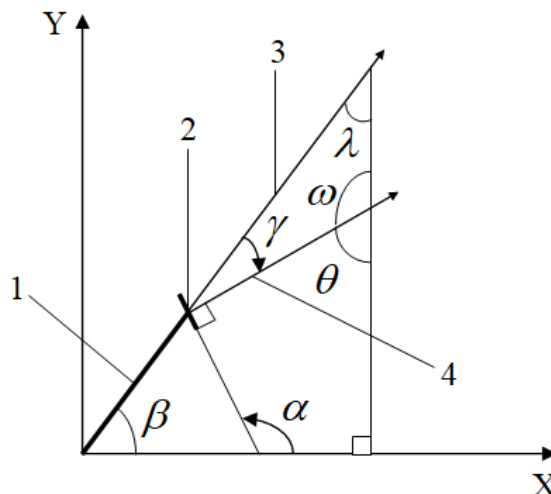
$$\angle \omega = 90 - \angle \theta, \quad (4.8)$$

$$\angle \gamma = 90 - \angle \omega, \quad (4.9)$$

$$\angle \gamma = 90 - 90 + 180 - \angle \alpha - \angle \beta = 180 - \angle \alpha - \angle \beta. \quad (4.10)$$

Таким чином, якщо виконується рівність (4.10), кисть буде знаходитися перпендикулярно до робочого столу. Програма UnitedRobotProject здатна обчислювати кути  $\alpha$  та  $\beta$  за заданими координатами  $(x, y, z)$  і кути  $\gamma$ . Щоб отримати такі кути, при яких кисть буде розташована перпендикулярно до робочого столу, необхідно змінювати кут  $\gamma$  (від  $0^\circ$  до  $100^\circ$ ), до тих пір, поки не буде виконана умова (4.10). Якщо на цьому відрізку не існує точки, в якій умова (4.10) виконується, то це означає, що або точка  $(x, y, z)$  знаходиться за межами робочої зони маніпулятора, або для неї неможливо забезпечити перпендикулярну орієнтацію схвата.

Крім визначення кутів повороту кисті, плеча, ліктя, актуальною є наступна задача: необхідно визначити такий кут повороту схвата, який би забезпечив захоплення об'єкта, що лежить під певним кутом (цей кут надходить від системи технічного зору). Крім того, якщо схват може повертатися в дуже широких межах (від  $-260^\circ$  до  $260^\circ$ ), то необхідно забезпечити мінімальний кут повороту для досягнення необхідної орієнтації. Визначення кута повороту схвата показано на рисунку 4.10.



1 – маніпулятор; 2 – об'єкт роботизації; 3 – вектор початкової орієнтації схвата; 4 – вектор необхідної орієнтації схвата

Рисунок 4.10 – Визначення кута повороту схвата

$$\gamma = 180^\circ - \angle \lambda - \angle \omega, \quad (4.11)$$

$$\angle \lambda = 90^\circ - \angle \beta, \quad (4.12)$$

$$\angle \theta = 180^\circ - \angle \alpha, \quad (4.13)$$

$$\angle \omega = 180^\circ - \angle \theta, \quad (4.14)$$

$$\angle \omega = 180^\circ - (180^\circ - \angle \alpha) = \angle \alpha, \quad (4.15)$$

$$\angle \gamma = 180^\circ - (90^\circ - \angle \beta) - \angle \alpha = 90^\circ + \angle \beta - \angle \alpha. \quad (4.16)$$

За результатами проведених розрахунків визначаємо кут  $\gamma$ , на який необхідно повернути схват робота.

#### 4.5 Програмна реалізація системи підтримки і прийняття рішень

Управління ТМР здійснюється шляхом відправки кодових посилок з асинхронного порту ЕОМ на порт ручного управління ТМР. Можна сказати, що фактично відбувається імітація натискання кнопок на пульті ручного управління в режимі JOINT. Посилки з пульта ручного управління надходять на СОМ порт. У свою чергу ЕОМ, виходячи з необхідних управляючих впливів, формує кодову посилку. Прийоми та відправки кодових посилок створюють в програмі потік класу TTranslateThread, який є спадкоємцем стандартного класу TThread.

```
TTranslateThread = class(TThread)
protected
    procedure Execute; override;
```

```

    procedure Translate;
end;
```

Активізація методу Execute відбувається в момент створення потоку і виконується в циклі доти, поки потік не буде зупинений за допомогою методу Suspend. Метод Translate циклічно викликається з Execute. Процедура Translate приймає посилки з COM порту в буфер RData та відправляє вміст буфера SData.

```

ReadFile(hCom,RData,BufSize,Bytes,nil);
ClearCommError(hCom,Errors,@Stat);
if TransMode=0 then
begin
    WriteFile(hCom,RData,BufSize,Bytes,nil);
end
else
begin
    WriteFile(hCom,SData,BufSize,Bytes,nil);
end;
```

Також передбачена ретрансляція посилки безпосередньо. Якщо встановити прапор TransMode в нуль, можна відключити подачу впливів керування з робота на маніпулятор. Це використовується для відключення управління в аварійних ситуаціях.

Крім того, метод Translate проводить стеження за станом руху ланок маніпулятора, а в разі, якщо якась ланка досягла заданого положення, припиняє подачу на неї впливів керування. Для формування буфера впливу керування SData використовується процедура GenMsg.

За допомогою функції InitSerialPort перед початком запуску потоку, що відповідає за управління маніпулятором, проводиться ініціалізація послідовного порту. А потім активізується процедура CaptureSignal, яка при передачі сигналу з пульта ручного керування запускає потік класу

TtranslateThread. Якщо сигнал з пульта ручного керування відсутній, то видається повідомлення про помилку.

Система технічного зору використовується для отримання інформації про об'єкти, які знаходяться в робочому просторі робота. Мова йде про відеокамеру, що встановлена на руці робота і підключена через USB (Universal serial bus) до ЕОМ. Зауважимо, що робот і камера підключаються до різних ЕОМ, а для обміну інформацією використовується локальна мережа. На обох машинах встановлюється мережевий протокол TCP/IP з виділенням IP-адрес. Для взаємодії з системою технічного зору використовується протокол UDP (User Datagram Protocol). Відправка і отримання повідомлень ведеться через порт 7777.

Перед початком роботи система управління промисловим роботом перевіряє наявність СТЗ: відправляє посилку «connect» і протягом трьох секунд очікує відповіді «connected». Якщо відповідь відсутня, то фіксується помилка. Якщо ж відповідь отримана, то система починає роботу.

Для отримання якісної картинки з зображенням робочого простору робота, камера повинна знаходитися на фокусній відстані перпендикулярно робочої площини. У зв'язку з цим система управління роботом спочатку забезпечує придатне для зйомки положення маніпулятора, а потім дає СТЗ команду на сканування (посилка «start\_scan»). Отримавши цю команду, СТЗ робить знімок і починає його аналізувати. Під час процесу аналізу система технічного аналізу виробляє розпізнавання та ідентифікацію об'єктів, які потрапили в кадр. Після закінчення ідентифікації СТЗ виробляє передачу інформації про виявлені об'єкти системі підтримки прийняття рішень. Для передачі використовуються позначення виду:

“object: номер об'єкту : координата X: координата Y : кут нахилу”

Після передачі інформації про всі об'єкти, що були виявлені, СТЗ відправляє посилку «end\_scan». Отримання цієї посилки системою

підтримки прийняття рішень є сигналом про початок розрахунку реальних координат об'єктів.

Для відправки та отримання повідомлень система підтримки прийняття рішень використовує об'єкт класу TNMUDP, який інкапсулює в собі всі необхідні поля і методи для роботи з UDP-пакетами.

Для відправки посилок використовується метод `SendBuffer`.

```
procedure SendBuffer(Buff: array of char; length: integer);
```

Для прийому інформації від СТЗ програма обробляє повідомлення `OnDataReceived`, яке виникає в момент отримання UDP-пакета. Оброблення повідомлень за допомогою `OnDataReceived` відбувається шляхом читання даних в проміжний буфер за допомогою методу `ReadBuffer`.

```
procedure ReadBuffer(var Buff: array of char; var length: integer);
```

У пакеті, як правило, міститься кілька інформаційних полів, тому виникає необхідність у його дробленні.

```
iLength:=0;
MyNMUDP.ReadBuffer(szDataBuffer,iLength);
szDataBuffer[iLength]:=chr(0);
iCountParam:=1;
szParam[0]:=@szDataBuffer[0];
iStrLen:=StrLen(szParam[0]);
for i:=1 to iStrLen do
  if szDataBuffer[i]='.' then
    begin
      szDataBuffer[i]:=chr(0);
      szParam[iCountParam]:=@szDataBuffer[i];
      inc(szParam[iCountParam]);
      inc(iCountParam);
    end;
```

Алгоритм дроблення пакета полягає в тому, що інформація в буфері міститься у вигляді рядка з завершальним нулем. У циклі проводиться заміна двокрапок, які є роздільниками, на символ '\0' – ознака закінчення рядка. Паралельно формується масив покажчиків `szParam`, куди записуються покажчики на рядки, які з'явилися як результат поділу. Таким чином, `szParam[0]` містить першу частину пакета, а `szParam[1]` – другу.

У базі даних зберігається інформація про об'єкти, з якими працює система. В свою чергу, база даних об'єктів реалізована в форматі Paradox 7 і містить одну таблицю, в якій поля поділені на дві групи.

Перша група полів, які містить інформацію, необхідну для правильного захоплення об'єктів, використовується системою підтримки прийняття рішень для розрахунку координат об'єктів. До неї належать такі поля:

- $X$  – координата  $X$  схвата в системі координат об'єкту;
- $Y$  – координата  $Y$  схвата в системі координат об'єкту;
- $Z$  – координата  $Z$  схвата в системі координат об'єкту;
- $X_x$  – координата  $x$  орта  $X$  системи координат схвата в системі координат об'єкту;
- $X_y$  – координата  $y$  орта  $X$  системи координат схвата в системі координат об'єкту;
- $X_z$  – координата  $z$  орта  $X$  системи координат схвата в системі координат об'єкту;
- $Y_x$  – координата  $x$  орта  $Y$  системи координат схвата в системі координат об'єкту;
- $Y_y$  – координата  $y$  орта  $Y$  системи координат схвата в системі координат об'єкту;
- $Y_z$  – координата  $z$  орта  $Y$  системи координат схвата в системі координат об'єкту;
- $Z_x$  – координата  $x$  орта  $Z$  системи координат схвата в системі координат об'єкту;

–  $Z_y$  – координата у орта  $Z$  системи координат схвата в системі координат об'єкту;

–  $Z_z$  – координата  $z$  орта  $Z$  системи координат схвата в системі координат об'єкту.

Поля другої групи, які містять інформацію, необхідну для ідентифікації об'єктів, розглядати докладно не будемо, вони призначені виключно для СТЗ та не використовуються системою підтримки прийняття рішень.

Разом із полями в БД розміщена й назва об'єкта та його умовний код.

Масив записів типу `TDetal` використовується для зберігання інформації про об'єкти, виявлені СТЗ

```
TDetal = record
    MyX,MyY,MyZ    :single;
    RealX,RealY,RealZ :single;
    Real_alfa      :single
    X,Y,Z          :single;
    Xx,Yx,Zx    :single;
    Xy,Yy,Zy    :single;
    Xz,Yz,Zz    :single;
    alfa           :single;
    Code           :integer;
    Name           :string;
end;
```

Щоб маніпулювати об'єктами відповідно до завдання, підсистема підтримки прийняття рішень повинна мати у своєму розпорядженні реальні координати об'єктів. Для розрахунку цих координат використовують такі вихідні дані:

– поточні координати камери, в системі пов'язаної з основою ТМР;

- координати одиничних ортів системи координат камери в системі, пов'язаної з основою ТМР;
- координати центру мас об'єкту в екранній площині камери;
- кут повороту об'єкта в екранній площині камери;
- необхідні координати схвата в системі координат пов'язаної з об'єктом;
- координати одиничних ортів системи координат схвата в системі, пов'язаної з об'єктом.

Для того, щоб перетворити координати, використовується множення матриць переходу розмірністю  $4 \times 4$ . Множення двох матриць реалізовано в процедурі `Mult_Matrix`.

```
procedure Mult_Matrix(a,b:TMatr;var c:TMatr);
```

Щоб обчислити реальні координати, необхідно виділити такі матриці переходу:

- матриця переходу з системи координат, пов'язана зі схопом в систему, пов'язану з об'єктом;
- матриця переходу з системи координат, пов'язана з об'єктом в систему, пов'язану з камерою;
- матриця переходу з системи координат, пов'язана з камерою в системі, пов'язана з основою робота.

Ініціалізація матриць переходу використовується з такими функціями `InitOz`, `InitKo`, `InitRk`. Кожна з функцій виробляє заповнення відповідної матриці переходу. Для простоти використання цих функцій більшість їх параметрів має значення за замовчуванням. Зокрема передбачається, що для захоплення об'єкта схват повинен розташовуватися перпендикулярно об'єкту.

Розглянемо докладно призначення параметрів функцій ініціалізації.

Опишемо параметри функції `InitOz`.

Координати ортів системи координат схоплення в системі координат об'єкту. Ці параметри задають положення, яке вимагає схоплення, щодо об'єкта під час захоплення:

- $(X_x, X_y, X_z)$  – орт  $X$ ;
- $(Y_x, Y_y, Y_z)$  – орт  $Y$ ;
- $(Z_x, Z_y, Z_z)$  – орт  $Z$ .

Орти задають орієнтацію схоплення відносно об'єкта (відносно системи координат з ним пов'язаної).

Координати початку системи координат схоплення в системі координат пов'язаної з об'єктом  $(OX, OY, OZ)$ .

Ці координати задають розташування схоплення щодо об'єкта. При  $OX=0$ ,  $OY=0$  схоплення знаходиться точно над центром об'єкта на висоті  $OZ$ .

Розглянемо параметри функції ініціалізації матриці переходу з системи координат пов'язаної з об'єктом в систему координат камери (InitKo):

- координати центру об'єкта в системі координат камери  $(x, y)$ ;
- кут орієнтації об'єкта (alfa) в робочій площині (в системі координат камери).

Розглянемо параметри функції ініціалізації матриці переходу з системи координат камери в систему координат, пов'язану з основою робота (InitRk).

Координати ортів системи координат камери в системі координат робота:

- $(X_x, X_y, X_z)$  – орт  $X$ ;
- $(Y_x, Y_y, Y_z)$  – орт  $Y$ ;
- $(Z_x, Z_y, Z_z)$  – орт  $Z$ .

Ці координати задають орієнтацію камери в просторі відносно системи координат ТМР.

Координати початку системи координат камери в системі координат пов'язаної з підставою робота ( $OX, OY, OZ$ ).

Дані координати задають розташування камери відносно основи ТМР. При цьому  $OZ$  – висота робочого столу в системі координат пов'язаної з основою робота, а не висота камери.

Після ініціалізації матриць переходу проводиться перемноження за допомогою функції `Mult_Matrix`.

Матриця, яку отримаємо в результаті перемноження, містить необхідні координати захоплення в підматриці  $p_{3 \times 1}$ :

$$T = \left[ \begin{array}{c|c} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ \hline f_{1 \times 3} & 1 \times 1 \end{array} \right] \quad (4.17)$$

За матрицею  $R_{3 \times 3}$  визначається кут повороту об'єкта.

#### 4.6 Висновки до 4 розділу

Автором роботи було розроблено метод координації та планування дій ТМР. Запропоновано підхід, який подає цей рівень системи управління як мережу спеціальним чином побудованих кінцевих автоматів.

Розроблено систему підтримки і прийняття рішень для ТМР, а також програмну реалізацію підсистеми підтримки і прийняття рішень.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 5.1 Промислова безпека та аналіз умов праці на робочому місці

Розміри лабораторії, в якій виконувалася робота, складають  $5\text{ м} \times 5\text{ м}$ . Робоче місце складається зі стола, стільця і персонального комп'ютера. У приміщенні працює 3 людини. Площа приміщення  $25\text{ м}^2$ , об'єм –  $75\text{ м}^3$ . Згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 площа на одне робоче місце має становити не менше  $6\text{ м}^2$ , а об'єм –  $20\text{ м}^3$ . Для даного приміщення робоча площа і об'єм на одну людину відповідає нормам, так як в нашому випадку площа на одне робоче місце становить  $8,3\text{ м}^2$ , а об'єм –  $25\text{ м}^3$ .

Живлення комп'ютерів здійснюється від трифазної чотирипровідної електричної мережі змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою  $220\text{ В}$ , частотою  $50\text{ Гц}$ .

Згідно НПАОП 40.1-1.21-98 лабораторію 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.

Згідно вимог НПАОП 0.00-4.12-05 необхідно провести увідний, первинний на робочому місці, повторний, цільовий та позаплановий інструктажі. Зміст інструктажу відповідає вимогам НПАОП 0.00-4.12-05. Інструктаж відзначається в відповідних журналах з підписами інструктованих і інструктора.

## 5.2 Виробнича санітарія в лабораторії

Робота в лабораторії проводиться сидячи і не вимагає фізичної напруги. Тому вона відноситься до категорії Ia (легкі фізичні роботи, енерговитрати до 120 ккал / год). З метою забезпечити комфортні умови для працівників та відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 у відвідуванні встановлені наступні метеорологічні параметри:

а) для холодного періоду:

- 1) температура повітря від 22 °С до 24 °С;
- 2) вологість повітря від 40 % до 60 %;
- 3) швидкість руху повітря оптимальна до 0,1 м/с;

б) для теплого періоду року:

- 1) температура повітря від 23 °С до 25 °С;
- 2) вологість повітря від 40 % до 60 %;
- 3) швидкість руху повітря оптимальна до 0,1 м/с [17].

Для освітлення робочих місць і приміщення в цілому застосовується як природне бічне освітлення, так і штучне освітлення.

Приміщення з ЕОМ 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 %:  $e^{IV} = 1,35$ , де  $e^{IV}_{\text{норм}}$  – нормоване значення КПО.

Згідно ДСН 3.3.6.037-99 [3] рівень шуму в лабораторії не перевищує 50 дБ.

Загальний рівень штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності.

Розрахункова формула методу :

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (5.1)$$

де  $W$  – питома потужність,  $Вт/м^2$ ;

$S$  – площа приміщення,  $м^2$ ;

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

$$W_{\Sigma} = W_{св} \cdot n_{св}, \quad (5.2)$$

де  $W_{св}$  – потужність одного світильника,  $W_{св} = 80 Вт$ ;

$n_{св}$  – кількість світильників у приміщенні,  $n_{св} = 4 шт.$

Дане приміщення має площу  $30 м^2$ , в якому розташовано шість світильників потужністю  $80 Вт$

$$W_{\Sigma} = 4 \cdot 80 = 320 Вт,$$

$$W = \frac{320}{30} = 11 Вт/м^2$$

Табличне значення для отриманого результат освітленість складе  $200 лк$ , коли відповідно до стандарту ДБН В.2.5-28-2006 в лабораторії освітленість повинна бути  $300 лк - 500 лк$ . Для отримання освітленості в  $400 лк$  необхідна питома потужність  $21 Вт/м^2$ .

### 5.3 Висновки до 5 розділу

Було виконано розрахунки освітлення робочих місць та приміщення в цілому. Результат розрахунків відповідає нормам, але для поліпшення умов роботи в лабораторії необхідно в денний час застосовувати додаткове освітлення.

## ВИСНОВКИ

В атестаційній роботі виконано інформаційне моделювання системи навчання ТМР в автоматизованому виробництві на інформаційному рівні організації тактико-технічного планування інформаційно-рухових дій.

Наведена узагальнена архітектура ТМР і загальний принцип побудови його моделі. Проаналізовано алгоритми планування.

Представлені інформаційні моделі багатокомпонентного ТМР. Виконано вибір способу організації управління робототехнічної системою.

Наведено метод координації і планування інтелектуалізації управління ТМР в складі автоматизованого виробництва.

В атестаційній роботі проаналізовано кілька підходів, пов'язаних з управлінням розподіленими робототехнічними системами. Ця проблема є надзвичайно важливою і перспективною, з огляду на явну тенденцію об'єднання технічних систем, що має результатом суттєве підвищення функціональних можливостей складної системи: так ПК, включений в локальну обчислювальну мережу має незрівнянно більші можливості, ніж ізольований ПК.

Під час виконання розділу «Охорона праці» були визначені небезпечні і шкідливі виробничі фактори. Таким чином, були розроблені заходи і технічні засоби щодо забезпечення безпеки праці працюючого персоналу. Застосування цих заходів дозволить максимально знизити ймовірність отримання травм під час роботи, а також поліпшити умови праці.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з «Розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи» для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітні програми: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» [Текст] / Упоряд. І.Ш. Невлюдов, В.В. Косенко, В.В. Євсєєв. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 55 с.
2. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. [Текст]: - К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.
3. Каляев, И.А. Интеллектуальные работы: учебное пособие для вузов / под общей редакцией Е.И. Юревича / И.А. Каляев, В.М. Лохин, И.М. Макаров и др. – М.: Машиностроение, 2009. – 360 с.
4. Невлюдов, І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації [Текст]: Підручник для студентів вищих навчальних закладів / І.Ш. Невлюдов. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2017 р. – 444 с.
5. Букарев, Р. Интеллектуальные работы [Текст] / Р. Букарев. – М.: Машиностроение, 2007. – 360 с.
6. Информационное моделирование функционирования интеллектуального робота [Электронный ресурс]: Studbooks. – Режим доступа:[https://studbooks.net/2063459/informatika/informatsionnoe\\_modelirovanie\\_funktsionirovaniya\\_intellektualnogo\\_robota](https://studbooks.net/2063459/informatika/informatsionnoe_modelirovanie_funktsionirovaniya_intellektualnogo_robota). – 17.10.18 - Загл. з екрану.
7. Невлюдов, І.Ш. Основи виробництва електронних апаратів [Текст]: Підручник / І.Ш. Невлюдов. – Харків: Компанія СМІТ, 2005. – 592 с.

8. Датчики [Электронный ресурс]: Искусственный интеллект. Системы и модели. – Режим доступа: <http://www.rriai.org.ru/datchiki.html>. – 19.10.18 - Загл. з экрану.

9. Time of flight sensor [Электронный ресурс]: Gasafsluiter elektrisch. – Режим доступа: <http://premrif.ru/time-of-flight-sensor/>. – 22.10.18 - Загл. з экрану.

10. Исполнительные механизмы [Электронный ресурс]: Искусственный интеллект. Системы и модели. – Режим доступа: <http://www.rriai.org.ru/ispolnitelnyie-mehanizmyi.html>. – 23.10.18 - Загл. з экрану.

11. Многозвенные манипуляторы [Электронный ресурс]: Робототехника. – Режим доступа: <http://roboticslib.ua/books/item/f00/s00/z0000016/st017.shtml>. – 23.10.18 - Загл. з экрану.

12. Программное обеспечение системы принятия решений адаптивного робота [Электронный ресурс]: Информатика, программирование. – Режим доступа: <https://uchil.net/cm=166289>. – 24.10.18 - Загл. з экрану.

13. Шагающие роботы [Электронный ресурс]: Автоматические системы транспортных средств. – Режим доступа: [https://studref.com/361498/tehnika/shagayuschie\\_roboty](https://studref.com/361498/tehnika/shagayuschie_roboty). – 25.10.18 - Загл. з экрану.

14. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы [Электронный ресурс]: Институт прикладной математики им. Келдыша. – Режим доступа: [http://keldysh.ru/papers/2001/prep40/prep2001\\_40.html](http://keldysh.ru/papers/2001/prep40/prep2001_40.html). – 01.11.18 - Загл. з экрану.

15. Алгоритмы планирования [Электронный ресурс]: Studbooks. – Режим доступа: [https://studbooks.net/2063461/informatika/algoritmy\\_planirovaniya](https://studbooks.net/2063461/informatika/algoritmy_planirovaniya). – 04.11.18 - Загл. з экрану.

16. Хапилин, В.К. Использование файлов сценариев для автоматизации действий пользователей [Текст] / В.К. Хапилин,

И.О. Осетинский, И.О. Яшков // East European Science journal. -2017. - PART 1, №11. - С. 105-110.

17. Системы принятия решений адаптивного робота [Электронный ресурс]: Хостинг документов. – Режим доступа: [https://doc4web.ua/informatika/programmnoe – obespechenie – sistemi – prinyatiya - resheniy-adaptivnogo.html](https://doc4web.ua/informatika/programmnoe_obespechenie_sistemi_prinyatiya_resheniy-adaptivnogo.html). – 05.11.18 - Загл. з экрану.

18. Выбор способа организации управления робототехнической системой [Электронный ресурс]: Studbooks. – Режим доступа: [https://studbooks.net/2063463/informatika/vybor\\_sposoba\\_organizatsii\\_upravleniya\\_robototekhnicheskoy\\_sistemoy](https://studbooks.net/2063463/informatika/vybor_sposoba_organizatsii_upravleniya_robototekhnicheskoy_sistemoy) – 05.11.18 - Загл. з экрану.

19. Метод координации и планирования [Электронный ресурс]: Studbooks. – Режим доступа: [https://studbooks.net/2063463/informatika/vybor\\_sposoba\\_organizatsii\\_upravleniya\\_robototekhnicheskoy\\_sistemoy](https://studbooks.net/2063463/informatika/vybor_sposoba_organizatsii_upravleniya_robototekhnicheskoy_sistemoy). – 07.11.18 - Загл. з экрану.

20. Дзюндзюк, Б.В. Охрана труда. Сборник задач [Текст]: учебное пособие/ Б.В. Дзюндзюк, В.Г. Иванов и др. – Харьков: ХНУРЭ, 2006. – 244 с.