

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)

_____ Модель адаптивного управління модульними «s-bots»

(тема)

Виконав:

студент _____ II курсу, групи _____ КСМм-21-1
_____ Чернов Б.Д.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність _____
_____ 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

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

Освітня програма _____
_____ Комп'ютерні системи та мережі
(повна назва освітньої програми)

Керівник: _____ доц. Токарєв В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

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

Освітня програма _____ Комп'ютерні системи та мережі _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Чернову Богдану Дмитрійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Модель адаптивного управління модульними «s-bots»

затверджена наказом по університету від “ 07 ” листопада 2022 р. № 1453Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 13 грудня 2022р.

3. Вхідні дані до роботи 1) провести дослідження моделі адаптивного управління модульними «s-bots»; 2) провести дослідження концепції побудови модульних «s-bots»; 3) провести дослідження - метода автономного адаптивного управління; 4) провести дослідження - метода самонавчання кінцевих автоматів; 5) провести дослідження способу побудови адаптивної системи управління модульними «s-bots».

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

1) огляд літератури за темою роботи;

2) аналіз предметної області;

3) вибір та обґрунтування методики дослідження;

4) проведення експериментальних досліджень;

5) висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____

Слайд-презентація – 18 слайдів _____

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою роботи	08.11.22 - 11.11. 22	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	13.11. 22 - 18.04. 22	
3	Вибір інструментальних засобів	19.11. 22 - 28.11. 22	
4	Проведення експериментів	29.11. 22 - 02.12. 22	
5	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	03.12. 22 - 06.12. 22	
6	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	07. 12. 22 - 08.12. 22	
7	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	09.12. 22 - 12.12. 22	

Дата видачі завдання 07 листопада 2022 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Токарев В.В. _____
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 60 с., 30 рис., 1 табл., 1 дод., 14 джерел.

ПРОТОКОЛ, «SWARM-BOT» SYSTEMS, WI-FI.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження моделі адаптивного управління модульними «s-bots».

У ході виконання кваліфікаційної роботи досліджується модель адаптивного керування модульними «s-bots». Запропоновано та експериментально перевірено алгоритми адаптивного керування, які можуть бути використані для розвитку теорії управління модульними «s-bots». Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що запропонований спосіб побудови системи управління та розроблені адаптивні алгоритми можна застосовувати при розробці модульними «s-bots» різного типу та призначення.

ABSTRACT

Master's thesis: 60 pages, 30 figures, 1 table, 1 appendices, 14 sources.

PROTOCOL, «SWARM-BOT» SYSTEMS, WI-FI.

The purpose of the qualification work is to study the model of adaptive control of modular «s-bots».

In the course of the qualification work, the model of adaptive control of modular «s-bots» is studied. Adaptive control algorithms that can be used to develop the control theory of modular «s-bots» are proposed and experimentally verified. The practical significance of the obtained results is that the proposed method of building a control system and the developed adaptive algorithms can be used in the development of modular «s-bots» of different types and purposes.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП	8
1 АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ МОДУЛЬНИМИ «S-BOTS» ...	10
1.1 Застосування до модульних «s-bots» методів штучного інтелекту	11
1.2 Інтелектуальні системи на основі штучних нейронних мереж.....	12
1.3 Модель поведінки, що базується на кінцевих автоматах	15
2 МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ МОДУЛЬНИМИ «S-BOTS» .	20
2.1 Спосіб побудови адаптивної системи управління модульними «s-bots»	20
2.2 Математична модель адаптивного управління модульними «s-bots»...	29
3 ПЕРЕВІРКА РОБОТИ МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РУХОМ МОДУЛЬНИХ «S-BOTS»	32
3.1 Закон зміни узагальнених координат задля досягнення цільової точки	32
3.2 Ключові фактори, що впливають на швидкість навчання.....	35
ВИСНОВКИ.....	47
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	48
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	51

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

ААУ – автономне адаптивне управління

БЗ – база знань

ГА – генетичний алгоритм

ДКАС – динамічний кінцевий автомат, що самонавчається

МСЕ – міжнародний союз електрозв'язку

МСО – мережа, яка самоорганізується

ПД – пропорційно-інтегрально-диференційні регулятори

ПЗ – програмне забезпечення

СМО – система масового обслуговування

СУ – система управління

ШНМ – штучні нейронні мережі

ФРО – формування та розпізнавання образів

ВСТУП

В даний час спостерігається активна інтелектуалізація програмованих «Swarm-bot» systems з структурою, що перебудовується, і логікою, що програмується, на основі різних методів, наприклад, таких як:

- нечітка логіка;
- нейронні мережі;
- еволюційні алгоритми;
- навчання з підкріпленням та інші.

Одним із актуальних напрямів розвитку систем штучного інтелекту є розробка адаптивних систем управління. Кваліфікаційна робота присвячена вирішенню проблем алгоритмічного та програмного забезпечення адаптивної системи управління модульними «s-bots». Модульний «s-bots» являє собою єдину багатоланкову конструкцію, яка складається з однотипних модулів. В даний час модульні «s-bots» знаходять все більш широке застосування в різних сферах людської діяльності, оскільки модульність конструкції та апаратних засобів обумовлює ряд переваг модульних «s-bots» в порівнянні з традиційними «Swarm-bot» systems. Сучасні тенденції розвитку «Swarm-bot» systems включають в себе активне застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання. Водночас, як показує аналіз публікацій, сучасні алгоритми управління модульними «s-bots» не передбачають автоматичної адаптивності «s-bots» до зміни властивостей довкілля, самого «s-bot» або виконуваної ним роботи. В основному широко використовується детерміноване управління, при якому бажана якість управління не досягається з ряду причин, пов'язаних з відсутністю адаптивних властивостей систем управління. По-перше, модульні «s-bots» мають велику кількість ступенів свободи, що, у свою чергу, робить дуже скрутним, а в ряді випадків і неможливим, знаходження точних аналітичних рішень з управління. По-друге, властивості довкілля «s-bots», та виконуваних ним завдань можуть

змінюватися незапланованим чином. До таких факторів можна віднести, наприклад, зміну властивостей поверхні, внаслідок зміни погодних умов або вихід з ладу окремих модулів. У зв'язку з цим, актуальним завданням є розробка алгоритмів і методів, а на їх основі моделі адаптивного управління стосовно модульних «s-bots».

1 АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ МОДУЛЬНИМИ «S-BOTS»

У даному розділі розглянуто основну проблему – концепція побудови модульних «s-bots». Концепція побудови модульних «s-bots» передбачає наявність однотипних мехатронних модулів, що об'єднуються в єдину багатоланкову конструкцію. Типові мехатронні модулі, як правило, включають до свого складу інтерфейсні майданчики для забезпечення взаємного механічного, електричного та інформаційного з'єднання, автономне джерело живлення, різні види датчиків, контролер, що управляє, один або кілька двигунів, найпростіші механічні передачі. Подібна конструкція типових модулів дозволяє забезпечити їх автоматичне стикування та розстикування для формування необхідної кінематичної структури модульних «s-bots» (конфігурації) залежно від цілей та умов функціонування.

Функціональні можливості модульних «s-bots» забезпечують їхню затребуваність у різних галузях.:

- у космічній галузі;
- у промисловій галузі;
- у системі освіти;
- у побутовій сфері.

Все це обумовлює високу актуальність теоретичних та прикладних досліджень у цій галузі, включаючи проблеми побудови програмного забезпечення для систем управління модульними «s-bots».

Зі збільшенням кількості модулів, які використовуються в модульних «s-bots», зростає і кількість можливих конфігурацій. Зокрема, в конфігурації «крокуюча платформа» використовується велика кількість модулів, і відповідно може бути різна кількість кінцівок і кількість модулів у кожній з них. При цьому неможливо заздалегідь закласти алгоритми управління всіх потенційно можливих конфігурацій. Також необхідно адекватно реагувати на

зміни властивостей середовища або «s-bots», наприклад у разі виходу з ладу одного з модулів.

1.1 Застосування до модульних «s-bots» методів штучного інтелекту

У зв'язку з цим, є актуальним питання про застосування до модульних «s-bots» методів штучного інтелекту, а саме механізмів самонавчання та адаптивних методів управління. До таких методів належать:

- штучні нейронні мережі;
- еволюційні алгоритми;
- кінцеві автомати, що самонавчаються;
- метод автономного адаптивного управління (ААУ) та ін.

Розглянемо їх докладніше. Еволюційні алгоритми є методами адаптивного пошуку для вирішення задач оптимізації та використовують аналоги механізму природного відбору та генетичного успадкування в живій природі, дозволяючи знайти оптимальне рішення за прийнятний час. До алгоритму даного класу відносяться:

- генетичні алгоритми (ГА);
- генетичне програмування (ГП);
- нейроеволюційні методи.

Класичний ГА працює за наступною схемою. Завдання формалізується таким чином, щоб рішення було закодовано у вигляді бітового вектора. набір потенційних рішень (особин), представлених у бітовому вигляді, утворюють популяцію. Кожна особина з поточної популяції оцінюється функцією придатності (fitness function), яка і визначає критерій оптимізації. Найбільш «пристосовані» особини беруть участь у генерації нової «популяції» – нового набору можливих рішень через механізми схрещування та мутації. Операція схрещування має на увазі під собою взаємний обмін генами двох особин, внаслідок чого з'являються два нові потенційні рішення. У загальному випадку

оператор схрещування є багатоточковим, і фрагменти генів, що підлягають обміну, визначаються випадковим вибором точок розриву у векторі генів батьківських особин. На практиці найчастіше використовують одноточковий оператор схрещування, що має лише одну точку розриву. Схрещування утворює аналог поступової оптимізації за градієнтом. Операція мутації має на увазі інвертування випадкового гена в особини та необхідна для виведення рішень з областей локальних екстремумів. На практиці ймовірність мутації вибирають у діапазоні від 0.5-1%, щоб не звести роботу ГА до методу випадкового пошуку. Критерієм зупинки роботи ГА може бути знаходження оптимального рішення чи вичерпання кількості ітерацій алгоритму чи часу його роботи. Складність практичного застосування генетичних алгоритмів пов'язана з вибором способу кодування рішень та формуванням функції придатності. У цілому ГА, як аналог природного методу оптимізації біологічних видів – це скоріше метод оптимізації конструкції, системи управління чи алгоритму управління, ніж власне метод адаптивного управління.

1.2 Інтелектуальні системи на основі штучних нейронних мереж

Інтелектуальні системи на основі штучних нейронних мереж (ШНМ) дозволяють успішно вирішувати завдання розпізнавання образів, прогнозування, оптимізації та управління складними динамічними системами, і поступово витісняють традиційні методи, що не мають достатньої гнучкості. Застосування ШНМ обумовлено як високою швидкістю, стійкістю до шумів, і адаптацією до змін довкілля. Але у разі ШНМ під адаптацією розуміють можливість апріорного навчання ШНМ діяти за прецедентами, що є в навчальній вибірці. Адаптація (навчання) ШНМ проводиться, як правило, а priori – до початку використання системи управління у робочому режимі. У

процесі роботи ШНМ вже не може донавчатись чи перенавчатися без загрози «катастрофічного забування» результатів попереднього навчання. Тому адаптацією це можна називати лише умовно, в обмеженому значенні. У цьому один з найважливіших недоліків ШНМ. Елементарною одиницею ШНМ є нейрон, який представляє собою спрощену модель природного нейрона.

Нейрони пов'язані між собою синапсами, що характеризуються числовим параметром в діапазоні $[0,1]$ або $[-1,1]$, званою вагою. З математичної точки зору, штучний нейрон є зваженим суматором всіх вхідних сигналів x з урахуванням відповідних ваг w , які застосовують до отриманої суми деяку просту функцію $F(S)$. Основними типами функцій активації, що використовуються зараз на практиці, є:

- гранична функція, що приймає значення 0 або 1, залежно від деякого рівня T ;
- логістична функція, що набуває значення в діапазоні $[0;1]$;
- функція гіперболічного тангенсу, що набуває значення в інтервалі $[-1;1]$.

Нейрони поділяються на три основні типи:

- вхідні;
- приховані;
- вихідні.

У разі коли ШНМ складається з великої кількості нейронів, вводиться поняття шару. На рисунку 1.1 наведено приклад багат шарової ШНМ, що має вхідний (показаний помаранчевим кольором), вихідний (показаний синім кольором) і два приховані шари (показані сірим кольором).

Налаштування, або так зване «навчання» ШНМ відбувається найчастіше теж не в реальному часі керування, а заздалегідь (навчання з вчителем) і передбачає наявність «навчальної вибірки» – пар вхідних сигналів та необхідного вчителем відгуку. Отримуючи вхідний вектор, нейронна мережа видає результат, який порівнюється з бажаним відгуком. Потім обчислюється

помилка між отриманим і бажаним відгуками, і виходячи з деякого алгоритму коригуються вагові коефіцієнти ШНМ.

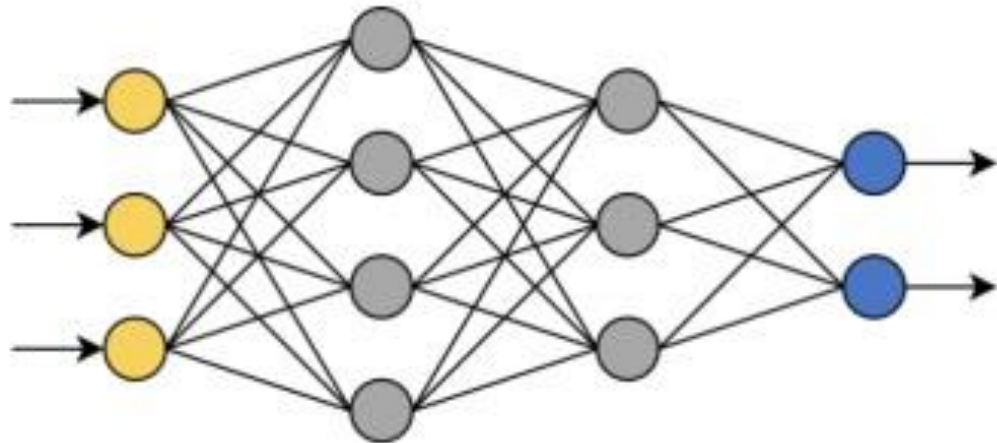


Рисунок 1.1 – Приклад багатошарової штучної нейронної мережі

Навчання ШНМ з вчителем вимагає наявності заздалегідь відомої навчальної вибірки, а також вибору топології ШНМ. Вибір топології ШНМ є нетривіальним завданням, що вимагає від її проектувальника часто нестандартного мислення і чуття, тому в даний час активно розвиваються механізми нейронних мереж, що самоорганізуються, з зростаючою топологією, які використовують генетичні алгоритми для визначення кращої і мінімально необхідної топології нейронної мережі, а також її параметрів.

Вперше використання генетичного алгоритму для налаштування ваг ШНМ із заздалегідь визначеною топологією запропоновано у 1994 році. Подальший розвиток даного підходу призвело до створення різних варіантів алгоритмів, що відрізняються один від одного використанням еволюційним методом та вибором генетичного уявлення. Слід зазначити, що ШНМ за своєю природою – це системи розпізнавання образів (чи апроксимації функцій), які навчаються з вчителем, а не власне системи управління. Завдання управління не зводиться лише до завдання розпізнавання. Рішення з управління, що приймаються, залежать від розпізнаної ситуації, але не тільки

від неї. Особливо при адаптивному управлінні, де потрібно навчитися як розпізнавати образи поточних станів, але й реагувати на них. Зазвичай ШНМ використовують для побудови простих систем керування, коли наперед відомо, що слід робити при розпізнаванні того чи іншого образу. Тобто, це керуючі системи, які забезпечують роботу за рефлекторним принципом «стимул – реакція», що є простим окремим випадком управління. Серед багатьох відомих підходів до організації процесів самонавчання та адаптації варто відзначити методи, розроблені представниками вітчизняної наукової школи.

1.3 Модель поведінки, що базується на кінцевих автоматах

Одним із перших методів адаптації є автоматичне налаштування параметрів системи управління. У цьому підході змінюються лише коефіцієнти, але не сам закон управління. Починаючи з 60-х років, ведуться дослідження моделей поведінки, що базуються на кінцевих автоматах. Функціонування автоматів даного типу засноване на виявленні оптимальних дій залежно від сигналів зворотного зв'язку – штрафу та заохочення, одержуваних від зовнішнього середовища.

Перебуваючи в одному з станів, автомат робить відповідну дію $u_i \in \{u_1, \dots, u_n\}$. При отриманні заохочувального сигналу автомат вважає зроблену дію правильною і повторить її на наступному кроці. Отримуючи сигнал штрафу, автомат навпаки, вважає зроблену дію помилкою і, залежно від глибини пам'яті автомата, або зробить ту саму дію, або змінить її на іншу. Число n , зване глибиною пам'яті автомата, задає кількість станів, у яких автомат робить одну й ту саму дію. Його сенс полягає в тому, що чим більше n , тим більше автомат буде інерційним і тим більша послідовність сигналів штрафу потрібна для зміни його дій.

Очевидно, що чим більша інерційність автомата, тим ближче він до того,

щоб вибравши найкращу в даному середовищі дію, продовжувати виконувати тільки її. Строго доведено, що при досить високих значеннях n , автомат забезпечує поведінку, близьку до найкращої. Як приклад, на рисунку 1.2 та рисунку 1.3 наведено діаграми переходів автомата з лінійною тактикою та «довірливого» автомата. Подальший розвиток методів самонавчання та адаптації представлений у концепції методу автономного адаптивного управління (ААУ). Наведемо його короткий опис. На рисунку 1.4 показана загальна структура системи, в якій, на відміну від традиційного підходу прийнятого в теорії управління, система управління (СУ) є частиною об'єкта управління ОУ.

Виходячи з цього, СУ одночасно здійснює дві функції:

- управління;
- самонавчання.

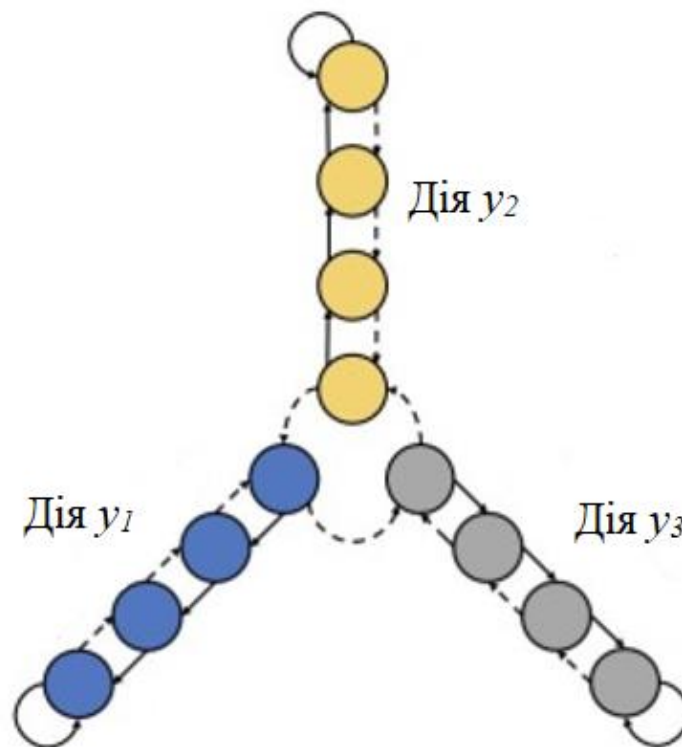


Рисунок 1.2 – Діаграми переходів автомата з лінійною тактикою

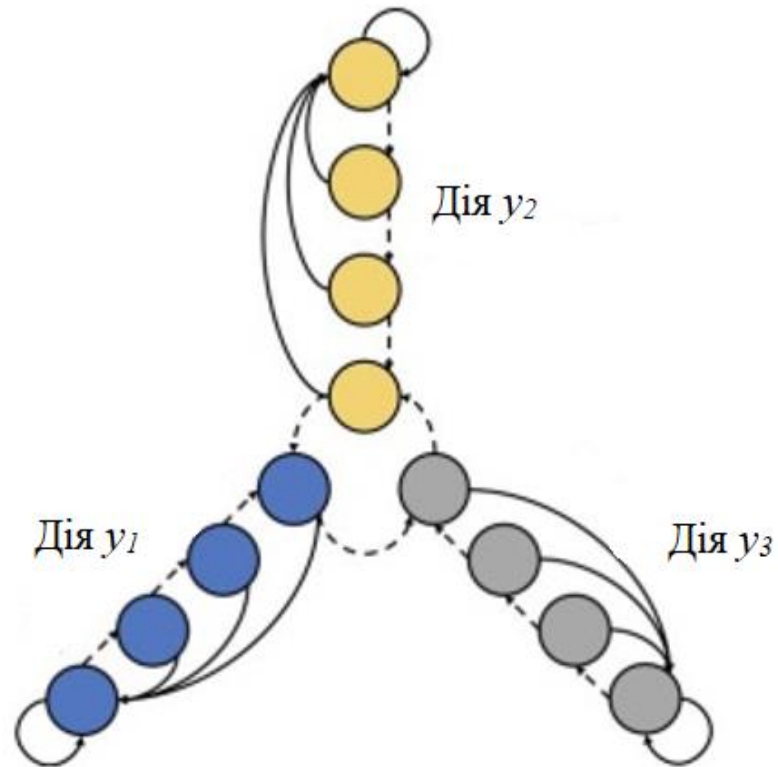


Рисунок 1.3 – Діаграми переходів «довірливого» автомата

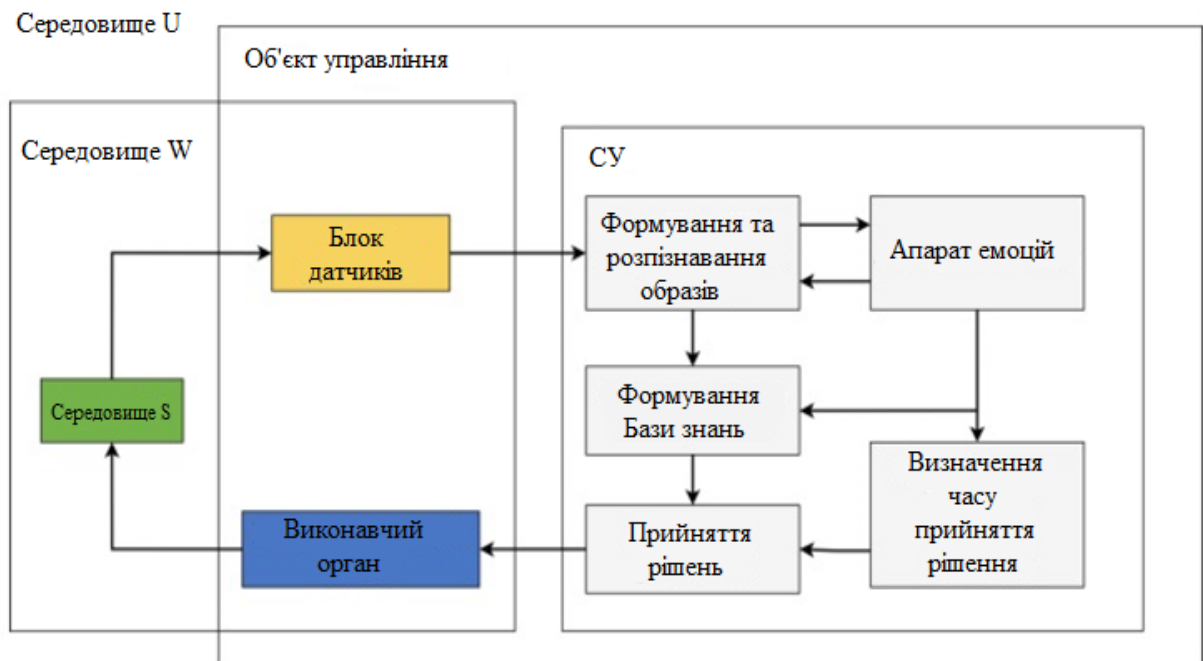


Рисунок 1.4 – Загальна структура системи ААУ

Оскільки система ААУ є біологічно інспірованою, то в ній присутня деяка система цілепокладання (мотивації) та якісної оцінки вчинених дій, а також станів, у яких вона може перебувати. У біологічних системах таку роль відіграє «Апарат емоцій». Далі за текстом ми називатимемо такі якісні оцінки – «емоційними».

Підсистема «Формування та Розпізнавання образів» (ФРО), отримуючи дані від датчиків, вирішує завдання системи розпізнавання, яка самонавчається. У «Базі знань» накопичуються емпіричні знання про можливості переходу між станами системи (у термінах образів), що розпізнаються. «Апарат емоцій» виконує 4-и важні функції:

- визначає якісні («емоційні») оцінки образів;
- визначає якість поточного стану через суму «емоційних» оцінок;
- задає універсальну цільову функцію – перехід у стан із максимальною із можливих у поточному стані «емоційних» оцінок;
- визначає внутрішній час системи управління.

Підсистема «Прийняття рішень» вибирає найкращу з дій, яка, згідно з поточним змістом «Базис знань», та доступним часом, переведе систему у стан з найкращими «емоційними» оцінками. Ухвалене рішення про дію повідомляється «Виконавчим органам» і запам'ятовується для подальшого аналізу. Одночасно відбувається накопичення нової інформації для донавчання чи перенавчання системи розпізнавання, «Базис Знань» та «Апарату емоцій». Підсистема «Формування Базис Знань» виявляє нові знання про причинно-наслідкові зв'язки «образів» та «дій». Управління повторюється циклічно із заданим постійним часом. Сучасні дослідники в області модульних «s-bots» зазвичай використовують еволюційні оптимізаційні алгоритми (ГА), комбінуючи їх з традиційними алгоритмами управління. З одного боку, складності такого підходу пов'язані з тривалими обчисленнями, моделюванням «популяції» модульних «s-bots» та оцінкою кожної з «особин»

функцією придатності. З іншого боку, ці підходи застосовуються на етапі розробки системи управління для її оптимізації, а робота в режимі реального часу в цих випадках практично неможлива.

Метод ААУ показав хороші результати стосовно різних об'єктів управління, як при моделюванні, так і в реальних умовах на фізичних прототипах. Його відмінною особливістю, порівняно з нейронними мережами, еволюційними алгоритмами та іншими методами адаптації, є можливість навчання та перенавчання безпосередньо у процесі функціонування об'єкта управління. Кваліфікаційна робота присвячена розвитку методу ААУ шляхом його застосування до управління модульними «s-bots», що в кінцевому рахунку, підпорядковане задачі підвищення якості та ефективності функціонування модульних «s-bots» і розвитку систем управління багатоланковими конструкціями. Застосування методу ААУ безпосередньо з розробкою нового способу побудови адаптивної системи управління модульними «s-bots».

2 МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ МОДУЛЬНИМИ «S-BOTS»

2.1 Спосіб побудови адаптивної системи управління модульними «s-bots»

Сучасні системи управління «s-bots» у переважній більшості випадків організовані ієрархічно. Це обумовлюється не так складністю конструкції самого «s-bot», скільки складністю і різноманіттям вчинених ним цілеспрямованих дій. Сенс ієрархічної системи полягає у функціональному поділі завдань між рівнями ієрархії. Так, наприклад, у більшості випадків на найнижчому рівні вирішуються завдання управління виконавчими механізмами. На наступному рівні вирішується в якій послідовності ними керувати.

На більш вищих рівнях вирішуються завдання побудови моделі середовища, людино-машинної взаємодії та планування дій. На практиці поділ системи управління на рівні дозволяє вносити зміни точково на окремих рівнях, не змінюючи систему загалом. Беручи до уваги функціональні можливості модульних «s-bots», у кваліфікаційній роботі ми зупинились на класичній ієрархічній системі управління. Вона складається з 3-х рівнів:

- рівень планування поведінки;
- рівень побудови траєкторій руху;
- приводний рівень.

Спираючись на цю 3-х рівневу систему, в кваліфікаційній роботі пропонується наступний спосіб побудови адаптивної системи управління. На рівні планування поведінки модульний «s-bot» отримує від оператора цільове завдання, поставлене у зручній для людини формі, наприклад, голосом або у вигляді тексту. На цьому рівні здійснюється наступне.

По-перше, модульним «s-bot» визначається поставлене оператором

завдання, описане у зручній для людини формі подання інформації (голос/текст). Незважаючи на широке коло завдань, що вирішуються сучасними s-bots, всі вони використовують обмежений набір можливих функціональних дій – маніпуляційних і транспортних. Таким чином, поставлені завдання можна звести до одного з наступних:

- маніпуляційне завдання (захоплення предмета, його переміщення щодо нерухомої основи «s-bot»);
- транспортне завдання (переміщення «s-bot» з поточної в потрібну точку простору);
- реконфігураційне завдання (реконфігурація модульних «s-bots» з однієї кінематичної схеми до іншої).

По-друге, вибирається оптимальна конфігурація модульного «s-bot» для виконання поставленого завдання. У процесі свого функціонування модульний «s-bot» безперервно взаємодіє із середовищем. Тому, одним із ключових аспектів при виборі тієї чи іншої конфігурації є розпізнавання форми перешкоди. Класифікація форм перешкод – це окремий напрямок досліджень, який проводився у прив'язці до розробки транспортних засобів різного типу та призначення. Так, согласно М.Г. Беккеру, несмотря на разнообразие препятствий, встречающихся в процессе движения, все они могут быть приведены к одному из двух типов формы:

- «уступ» (контрескарп);
- «виступ» (ескарп).

Вони можуть зустрічатися як окремо, так і в поєднанні, і, в останньому випадку, утворюють нові види - «канава» або «насип». Класифікацію Беккера можна доповнити перешкодою типу «арка», характерною особливістю якої є наявність горизонтального блоку, що обмежує конфігурацію модульного «s-bot» по висоті. На рисунках 2.1 – 2.6 наведено зовнішній вигляд типових перешкод.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд типових перешкод – уступ



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд типових перешкод – виступ

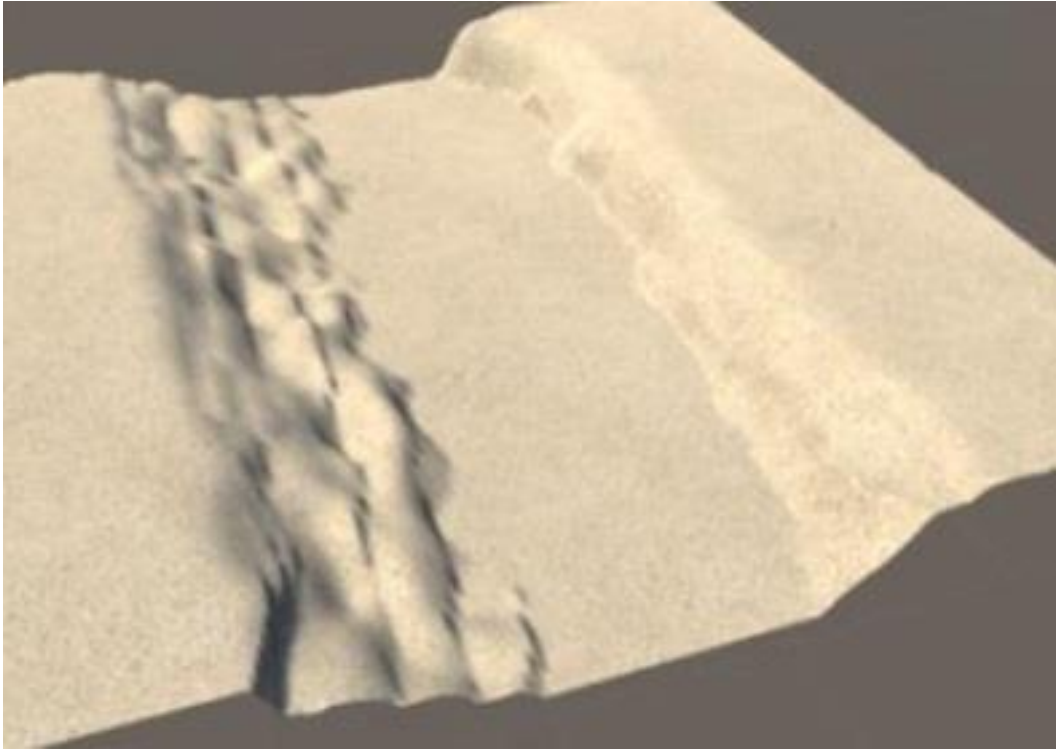


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд типових перешкод – канава

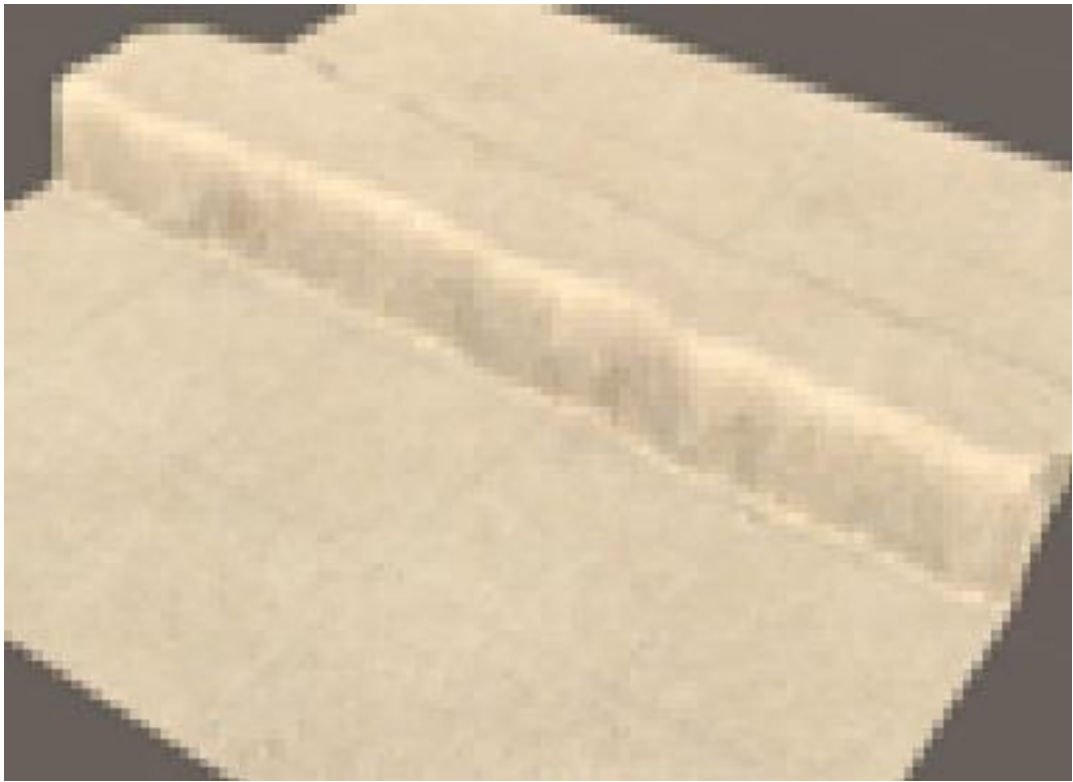


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд типових перешкод – насип

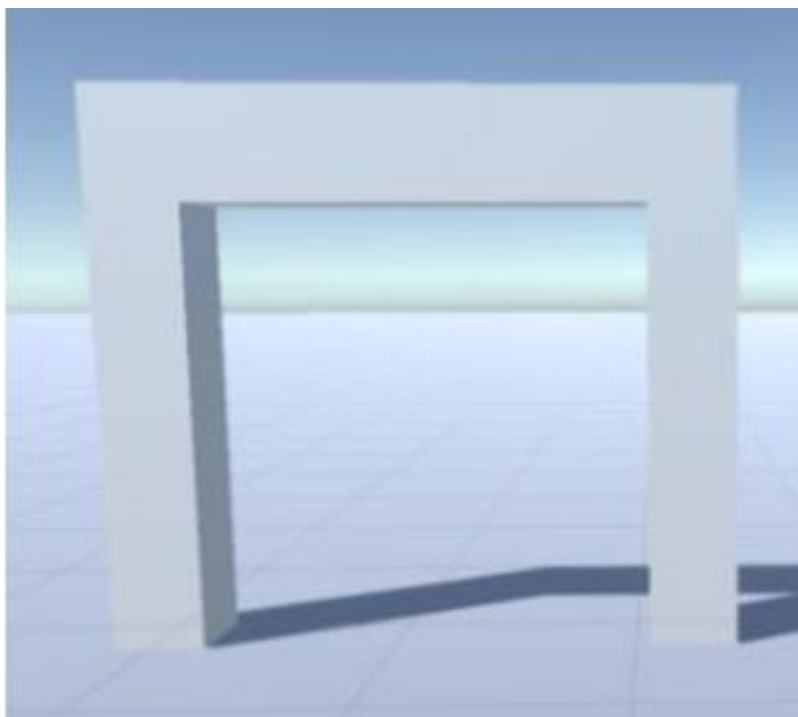


Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд типових перешкод – висока арка

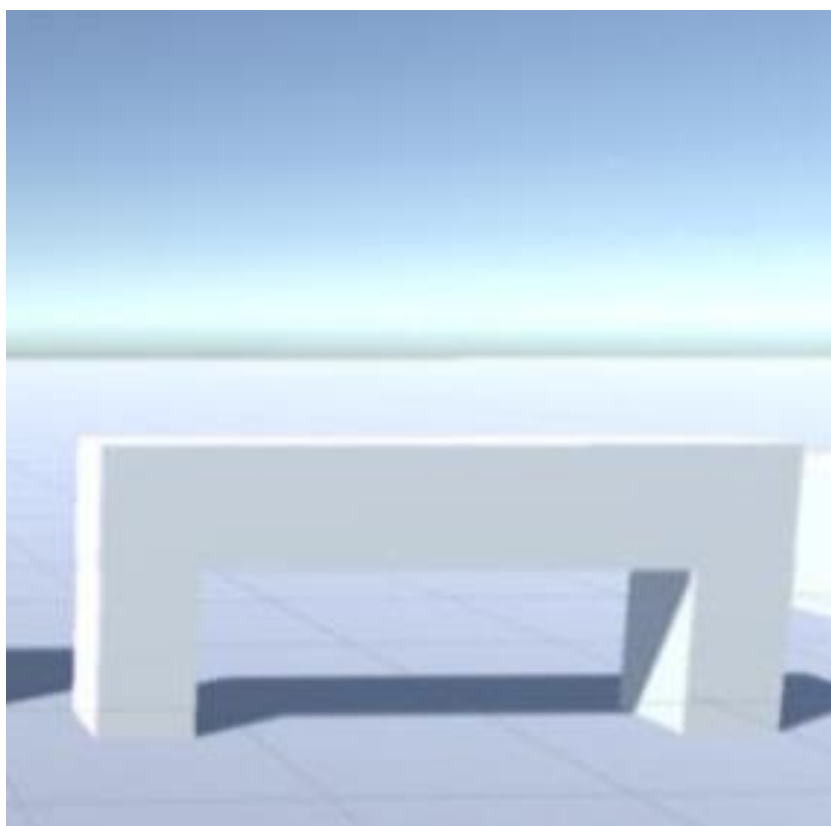


Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд типових перешкод – низька арка

Усі п'ять типів перешкод можуть знижувати показники прохідності модульного «s-bot», а в ряду випадків, при неправильному виборі конфігурації, викликають і неможливість їх подолання. В таблиці 2.1 представлено передбачувану відповідність класів ситуацій і використовуваних типів конфігурацій. Крім того, варто відзначити, що існує також клас непереборних перешкод, наприклад таких, як високі стіни, при виникненні яких необхідно перебудувувати маршрут модульного руху «s-bot».

Таблиця 2.1 – Відповідність типу завдання та умов зовнішнього середовища конфігурації модульного «s-bot».

Тип завдання	Умови зовнішнього середовища	Конфігурація модульного «s-bot»
Маніпуляційне завдання «Переміщення об'єктів»	–	Маніпулятор
Транспортне завдання «Перевезення вантажів»	–	Крокуюча платформа
–	Низька арка	Гусінь
–	Висока арка	–
Транспортне завдання	Уступ	–
Прибуття до точки	Виступ	Гусінь, Колесо або Крокуюча платформа
–	Канавка	–
–	Насип	–

По-третє, формується план дій, що призводить до успішного виконання поставленого завдання. Варто зазначити, що цей рівень передбачає проведення моделювання функціонування модульного «s-bot» на борту, за рахунок спеціальних програмних засобів для моделювання.

На рівні побудови траєкторій руху адаптивно формується закон зміни узагальнених координат модульного «s-bot», для досягнення цільової точки з

урахуванням особливостей зовнішнього середовища. Адаптація досягається за допомогою застосування методу автономного адаптивного управління (ААУ). У кваліфікаційній роботі головний акцент зроблено на цьому рівні.

Привідний рівень здійснює управління виконавчими механізмами модульного «s-bot», забезпечуючи реалізацію елементарних траєкторій руху. Адаптація на цьому рівні передбачає зміну параметрів або закону управління у відповідь на зовнішні збурення, наприклад, зміна температурних характеристик або навантаження на вал двигуна.

Привідний рівень системи керування модульного «s-bot» на сьогоднішній день є опрацьованим. Для якісного управління виконавчими механізмами часто використовують класичні рішення, що ґрунтуються на пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторах. Активно використовуються й інтелектуальні методи, що ґрунтуються на нечіткій логіці. Метод ААУ, застосований до управління виконавчими механізмами, показує хороші результати. Оскільки цей рівень достатньо опрацьований, у кваліфікаційній роботі ми не будемо спеціально на ньому зупинятись і використовуватимемо просту, найбільш підходящу для нашого випадку модель.

Перші два рівні повинні розташовуватися на борту одного з мехатронних модулів модульного «s-bot» (для зручності постановки експериментів ці рівні можуть розташовуватися на зовнішньому обчислювальному пристрої). Будемо називати такий модуль – головним. Залежно від ситуації, функції головного модуля можуть бути передані іншому модулю. Для можливості передачі функцій головного модуля іншому, в кожен модуль записується одне й те саме програмне забезпечення. Виконавчий рівень, враховуючи конструктивні особливості модульного «s-bot», є фізично розподіленим. Ключовою відмінністю запропонованої системи управління є запровадження механізму адаптації на основі методу ААУ на рівні побудови траєкторій руху. Таким чином, структуру адаптивної системи управління модульного «s-bot» можна представити у вигляді наступної схеми (рисунок 2.7).

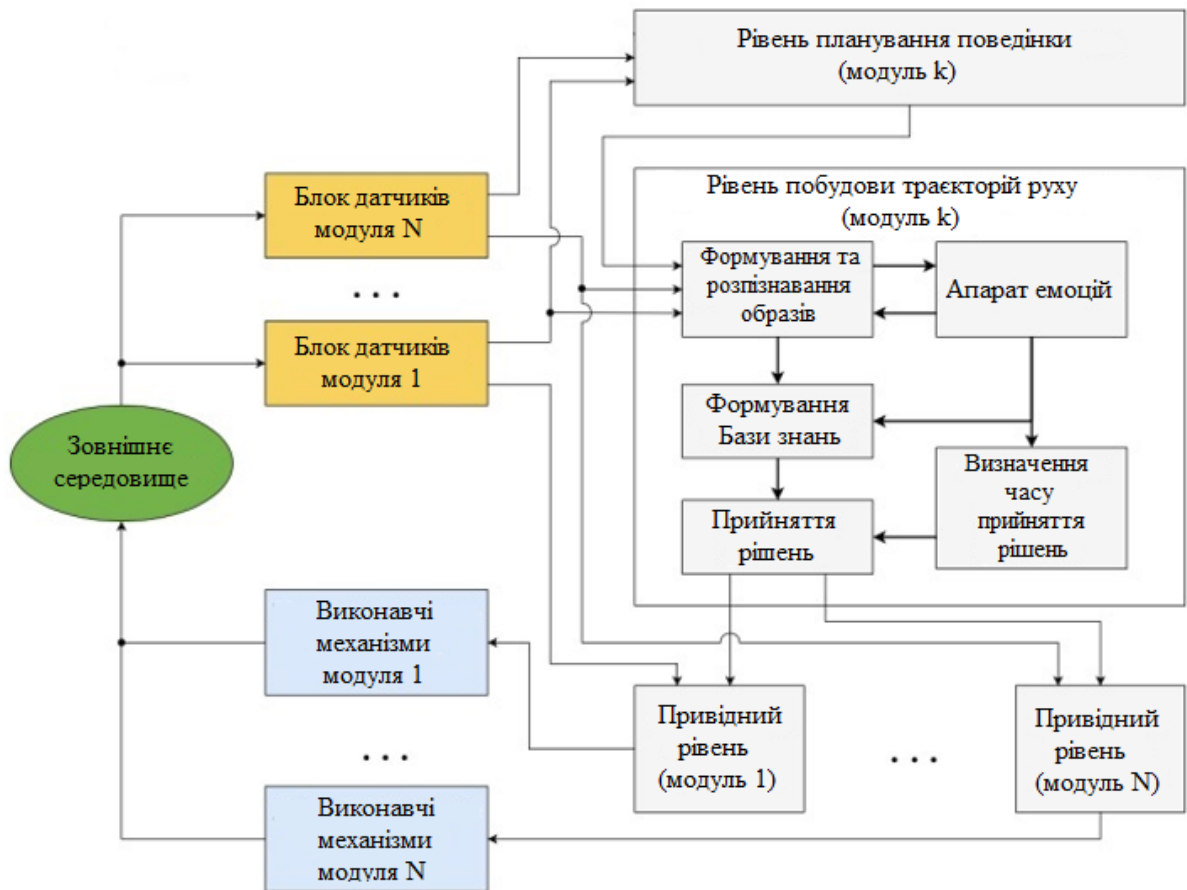


Рисунок 2.7 – Структура адаптивної системи управління модульними «s-bots»

Як видно із схеми, наведеної на рисунку 2.2, рівень планування поведінки і рівень побудови траєкторій руху отримують сенсорні дані з кожного з модулів. Виконавчий рівень кожного з модулів є незалежним, тому отримує сенсорні дані з блоку датчиків тільки того модуля, до якого він відноситься.

Згідно з методом ААУ, система управління має 2 контури:

- контур управління;
- контур навчання.

Такт функціонування системи управління складається з наступних операцій. У контурі управління:

- читання даних із блоку датчиків;

- розпізнавання образів, з урахуванням отриманої сенсорної інформації;
- оцінка «апаратом емоцій» розпізнаних образів;
- розрахунок поточної загальної «емоційної» оцінки прийняття рішення про дію на основі розпізнаних та сформованих образів, загальної «емоційної» оцінки, її похідної та бази знань.

У контурі навчання:

- формування нових образів, з урахуванням отриманої сенсорної інформації;
- якісна оцінка «апаратом емоцій» нових, сформованих образів;
- формування нових знань, на основі розпізнаних та сформованих образів та вчинених на попередньому кроці дій.

Виходячи з перерахованих операцій, ключовими моментами для застосування методу ААУ до управління модульними «s-bots» є визначення:

- набору сенсорів, що входять до «блоку датчиків»;
- способу формування та розпізнавання образів у блоці «ФРО»;
- способу розрахунку «емоційної» оцінки «апаратом емоцій»;
- форми подання знань у «базі знань»;
- набору можливих дій виконавчих механізмів.

Коротко сформулюємо основні положення запропонованого способу побудови адаптивної системи управління модульними «s-bots».

Адаптивна система управління повинна будуватися ієрархічно (для функціонального поділу завдань між рівнями ієрархії) та містити 3 рівні:

- рівень планування поведінки;
- рівень побудови траєкторій руху;
- приводний рівень.

Верхні 2 рівні (рівень планування поведінки та рівень побудови траєкторій руху) повинні розташовуватися на борту одного з мехатронних модулів. Адаптивність системи управління має забезпечуватися за рахунок використання методу ААУ. На кожному з типових модулів стоїть одне й те

саме програмне забезпечення. Система управління повинна включати до свого складу засоби програмного моделювання для проведення навчання або перенавчання без участі реального фізичного «s-bot».

2.2 Математична модель адаптивного управління модульними «s-bots»

У цьому розділі розглядається математична модель, яка спрощено описує роботу методу ААУ. Пропонована модель, далі будемо називати її динамічний кінцевий автомат, що самонавчається – (ДКАС), ґрунтується на теорії кінцевих автоматів та розширює її. Принципові відмінності від традиційних кінцевих автоматів – введення динамічної функції виходів та функції формування нових станів, а також замикання виходів автомата на його вхід. ДКАС описується кортежем:

$$\langle S, A, D, F, \psi, E, s_0, f, d \rangle, \quad (2.1)$$

де S – кінцева поповнювана безліч станів;

A – поєднана кінцева множина вхідних і вихідних символів (множина дій);

D – динамічна функція виходів;

F – функція формування нових станів;

ψ – функція переходів;

E – функція якісної оцінки станів;

f – коефіцієнт самонавчання;

d – коефіцієнт глибини пошуку рішення;

s_0 – початковий стан автомата $s_0 \in S$.

Важливо відзначити, що вихід ДКАС замкнений на вхід, тобто символ $a_i \in A$, продуцирований на вихід, надходить на вхід автомата та провокує перехід у новий стан та новий вихідний символ. Цей процес описується

законами функціонування ДКАС. Вхід $a_t \in A$ в момент часу t однозначно визначається попереднім станом:

$$a_t = D(s(t-1)f), \quad (2.2)$$

де D – динамічна функція переходів, що визначає вихід автомата з урахуванням попереднього стану на основі багатокритеріального вибору. Якщо відношення потужності множини $B \subseteq A$ (яке відображає відомі можливі переходи зі стану $s(t-1)$) до потужності множини A більше f , то a_t вибирається шляхом рівноймовірнісного вибору з множини $C = A \setminus B$. В іншому випадку a_t вибирається таким, що:

$$E(s(t+d)) \rightarrow \max(E(S)), \quad (2.3)$$

де E – багатокритеріальна функція якісної оцінки станів.

Новий стан $s(t)$ в момент часу t однозначно визначається станом $s(t-1)$ та вхідним символом a_t :

$$s(t) = \psi(s(t-1)a_{t-1}), \quad (2.4)$$

де ψ – функція переходів.

Визначення 1. Стан p ($p \in S$) називається стійким, для $\forall s$ ($s \in S$) \exists послідовність (a_n) така, що здійснюється перехід у стан p . Безліч стійких станів будемо позначати P ($P \subseteq S$).

Теорема 1 (теорема збіжності). Існує послідовність вхідних символів (a_1, a_2, \dots, a_n) така, що ДКАС переходить у стійкий стан p_b такий, що $E(p_b) = \max(E(P))$.

Доведення. Нехай у деякий момент часу t автомат перебуває у стані $s(t)$.

Розглянемо динамічну функцію переходів D . Відповідно до визначення 1, зі стану $s(t)$ може бути здійснено перехід у будь-який із станів $p \in P$. Тоді очевидно, що $\exists d$ таке, що $E(s(t + d)) = \max(E(P))$ щодо визначення роботи динамічної функції переходів. При цьому $s(t + d) \in P$. Що і потрібно було довести.

3 ПЕРЕВІРКА РОБОТИ МОДЕЛІ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РУХОМ МОДУЛЬНИХ «S-BOTS»

3.1 Закон зміни узагальнених координат задля досягнення цільової точки

У даному розділі кваліфікаційної роботи розглядаються алгоритми адаптивної системи управління рухом модульних «s-bots» у конфігураціях «маніпулятор» та «крокуюча платформа». Розглянемо докладніше рівень побудови траєкторій руху адаптивної системи управління. На цьому рівні адаптивно формується закон зміни узагальнених координат задля досягнення цільової точки. Найменш розробленими конфігураціями модульних «s-bots» є «маніпулятор» і «крокуюча платформа», тому в рамках кваліфікаційної роботи зроблено акцент саме на цих конфігураціях. Завдання щодо знаходження закону зміни узагальнених координат задля досягнення цільової точки можна формалізувати в такий спосіб. Початкова конфігурація C_0 модульних «s-bots» задана безліччю узагальнених координат, що однозначно визначають його положення в просторі:

$$C_0 = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}, \quad (3.1)$$

де n – кількість модулів, що входять до складу модульного маніпуляційного робота.

Мета задана координатами у тривимірному просторі $(x_{ц}, y_{ц}, z_{ц})$, відносно локальної системи координат модульного робота. Необхідно знайти таку послідовність конфігурацій $\{C_0, \dots, C_k\}$, що:

$$\sqrt{(x_k - x_{ц})^2 + (y_k - y_{ц})^2 + (z_k - z_{ц})^2} \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

де (x_k, y_k, z_k) – координати кінця кінематичного ланцюга, що визначається конфігурацією S_k .

У кваліфікаційній роботі пропонується два способи розв'язання цього завдання, кожен із яких заснований на методі ААУ. Блок датчиків повинен містити сенсори кутового положення кожного з модулів «s-bot», датчики, що дозволяють оцінити навколишнє оточення (відстань до перешкод і цільової точки, їх координати щодо локальної системи координат «s-bot»).

1-й спосіб. У цьому випадку образами системи формування та розпізнавання образів (ФРО) можуть бути набори узагальнених координат $C = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, що визначають поточну конфігурацію модульного «s-bot». В якості прикладу на рисунках 3.1 – 3.3 наведено різні набори координат та відповідні їм конфігурації модульного реконфігурованого «s-bot».

Нормована «емоційна» оцінка розпізнаного способу поточної конфігурації залежить від відстані d кінця кінематичного ланцюга до цільової точки, розміру її ε -околиці і розраховується за формулою:

$$E = \begin{cases} \varepsilon/d, & d \geq \varepsilon \\ 1, & d < \varepsilon \end{cases} \quad (3.3)$$



Рисунок 3.1 – Приклади конфігурацій маніпуляційного модульного «s-bot»



Рисунок 3.2 – Приклади конфігурацій маніпуляційного модульного «s-bot»



Рисунок 3.3 – Приклади конфігурацій маніпуляційного модульного «s-bot»

Значення нормованої «емоційної» оцінки буде в діапазоні $[0,1]$, що дозволяє легко перевести її в будь-яку іншу шкалу. Варто зазначити, що в процесі свого функціонування система може здійснити низку дій, які призведуть до зіткнення модулів один з одним (рисунок 3.4). У цьому випадку такий образ поточної конфігурації «s-bot» має мінімально можливу «емоційну» оцінку, навіть незважаючи на те, що «s-bot» відпрацював цільову точку.

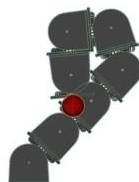


Рисунок 3.4 – Приклад відпрацювання точки зі зіткненням між модулями «s-bot».

Типовими діями реконфігурованого модульного «s-bot» є або фіксація поточного кутового положення i -го модуля, або його зміна на величину Δ (як у позитивному, так і в негативному напрямку). Таким чином, кількість можливих дій «s-bot» дорівнює $3n$, де n – кількість ланок.

$$E = \begin{cases} q_i + \Delta \\ q_i - \Delta, \\ q_i \end{cases} \quad (3.4)$$

3.2 Ключові фактори, що впливають на швидкість навчання

Одним із ключових факторів, що впливають на швидкість навчання у методі ААУ, є спосіб вибору дій. Наприклад, можна перебирати дії одна за одною, або вибирати дії випадково. Можна розглянути способи вибору дій із застосуванням генетичних алгоритмів та градієнтного спуску. У нашому випадку застосовується метод випадкового вибору дій із поверненням у ситуацію з найкращою «емоційною» оцінкою. Адаптивна система управління запам'ятовує найкращу «емоційну» оцінку, яка була отримана в процесі функціонування системи. У разі якщо «s-bot» знаходиться деякий час τ в ситуації з не найкращою «емоційною» оцінкою, то відбувається перехід у ситуацію з найкращою «емоційною» оцінкою. Повернення в таку ситуацію можливе завдяки структурі «образів», які являють собою, як сказано вище, набір узагальнених координат.

Таким чином, система може переглянути весь список образів, вибрати і перейти в образ з найкращою оцінкою, відпрацювавши необхідні кути зчленування. Недоліком такого підходу є те, що із зменшенням величини Δ кількість образів суттєво зростає. При цьому більше значення величини Δ може не забезпечити необхідної точності. Цей спосіб

застосування методу ААУ до управління мобільного «s-bot» можна формалізувати, використавши описану раніше математичну модель ДКАС. Застосовуючи модель, встановимо, що множині S відповідають образи системи ФРО – набори узагальнених координат мобільного «s-bot», множина A визначається типовими діями мобільного «s-bot», «емоційна оцінка» бере участь у роботі динамічної функції виходів D . Робота системи відбувається в такий спосіб. У початковий момент часу ДКАС перебуває у стані s_0 (рисунок 3.5), потім функція D ініціює деяку дію a_1 , яка може або перевести автомат у новий стан s_1 (рисунок 3.6) або залишити у поточному стані s_0 (рисунок 3.7). Потім процес вибору дії повторюється, і тим самим відбувається автоматична побудова ДКАС.



Рисунок 3.5 – Приклад роботи ДКАС стосовно 1-го способу управління методом ААУ

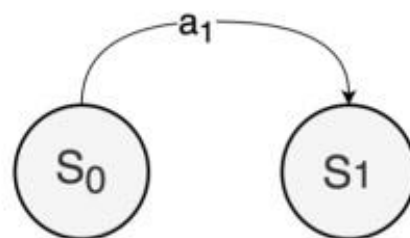


Рисунок 3.6 – Приклад роботи ДКАС стосовно 1-го способу управління методом ААУ

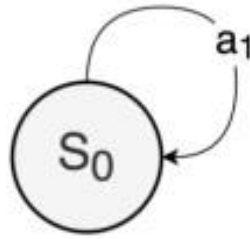


Рисунок 3.7 – Приклад роботи ДКАС стосовно 1-го способу управління методом ААУ

Динамічна функція виходів D регулює роботу автомата таким чином, щоб він виявився в змозі з найкращою якісною («емоційною») оцінкою, а сама структура автомата представляє собою базу знань.

2-й спосіб. У цьому випадку образами системи ФРО є положення мобільного схвату «s-bot» відносно цільової точки, яка може описуватися комбінацією понять «лівіше»/«правіше» та «вище»/«нижче» (рисунок 3.8).

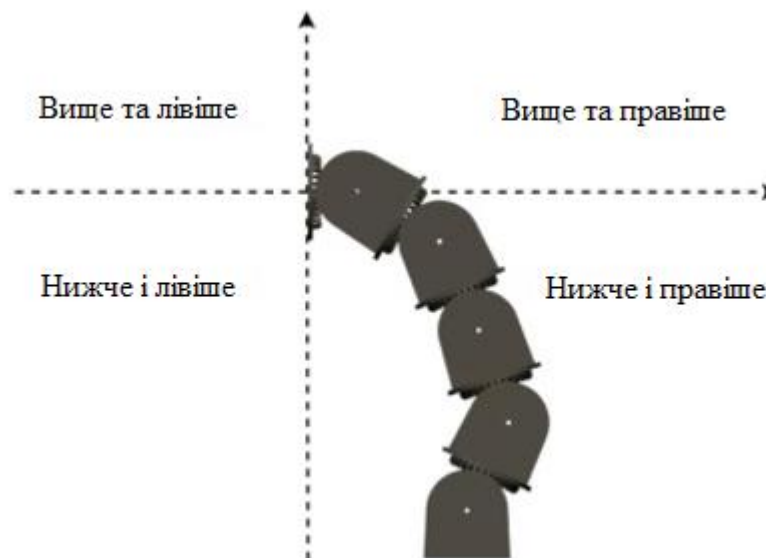


Рисунок 3.8 – Образи системи ФРО, залежно від розташування схвата мобільного «s-bot» щодо цільової точки

Типовими діями в даному випадку також є фіксація поточного кутового положення i -го модуля або зміна його на величину Δ . Однак, на відміну від попереднього способу, значення Δ може бути як завгодно малим і обмежено лише роздільною здатністю конкретного приводу. Процес «s-bot» циклічний та ітеративний, тобто на початку дії здійснює 1-й модуль, потім 2-й і т.д., а потім процес повторюється. «Емоційна» оцінка полягає в зміні неузгодженості між схватом і цільової точкою, і розраховується так:

$$E = \begin{cases} 0, & r_r - r_n \geq 0 \\ 1, & r_r - r_n < \varepsilon \end{cases}, \quad (3.5)$$

де r_T – значення неузгодженості між кінцем кінематичного ланцюга та цільовою точкою на поточному кроці;

r_{II} – значення неузгодженості між кінцем кінематичного ланцюга та цільовою точкою на попередньому кроці.

Недоліком такого підходу є відсутність інформації у структурі образів про поточну конфігурацію маніпулятора. Це своє чергу унеможлиблює планування руху. Крім того, існують такі взаємні положення маніпулятора та цільової точки, при яких завдання приходу в цільову точку не буде вирішено.

Варто зазначити, що обидва такі підходи можуть застосовуватися не тільки до «s-bot» у конфігурації «маніпулятор», але і в конфігурації «крокуюча платформа». Для цього кожному з кінцівок крокуючого «s-bot» можна розглядати як окремий маніпулятор (рисунок 3.8).

При цьому завдання руху зводиться до двох підзавдань:

- завдання перестановки окремої кінцівки на цільову точку. Цільова точка розраховується автоматично на кожному кроці – зміщується щодо кінця кінцівки на задану величину кроку d ;

- задача послідовної перестановки кінцівок, необхідних для

пересування платформи.

Перше підзавдання вирішується одним із викладених вище способів.

Друга – вибором варіанта ходи, тобто перестановки кінцівок крокуючого «s-bot». В якості припущення розглядатимемо варіанти так званої «обережної» ходи, коли на кожному етапі руху переміщується тільки одна кінцівка. У цьому випадку втрата або збереження стійкості крокуючої платформи можуть розглядатися як «емоційна» оцінка. Експериментальні дослідження адаптивної системи управління рухом модульних «s-bots» у конфігураціях «маніпулятор» та «крокуюча платформа» проводилися в домашніх умовах.

Мета експериментів полягала в дослідженні працездатності розроблених способів застосування методу ААУ стосовно управління модульних «s-bots» в конфігураціях «маніпулятор» і «крокуюча платформа».

Розглядалися два методи управління модульних «s-bots» у конфігурації «маніпулятор» і управління «крокуючою платформою». Варто зазначити, що моделювання проводилося з обмеженим набором датчиків, а саме датчиків кута повороту в модулях, оскільки метою експериментів є демонстрація здібностей системи ААУ до самонавчання на прикладі руху модульних «s-bots». Відстань до мети визначалося програмно у віртуальному середовищі. Запропонований перший метод досліджувався при різних початкових параметрах Δ та різній кількості модулів у складі кінематичного ланцюга.

На рисунку 3.9 показані, отримані в результаті експериментів, залежності часу навчання від кількості модулів у кінематичному ланцюзі при різних початкових значеннях параметра Δ . Видно закономірність між кількістю модулів, точністю та часом навчання при фіксованому значенні Δ . Чим більше модулів перебуває в кінематичному ланцюзі, тим більший час навчання. При цьому видно, що чим вище значення Δ , тим швидше здійснюється навчання.

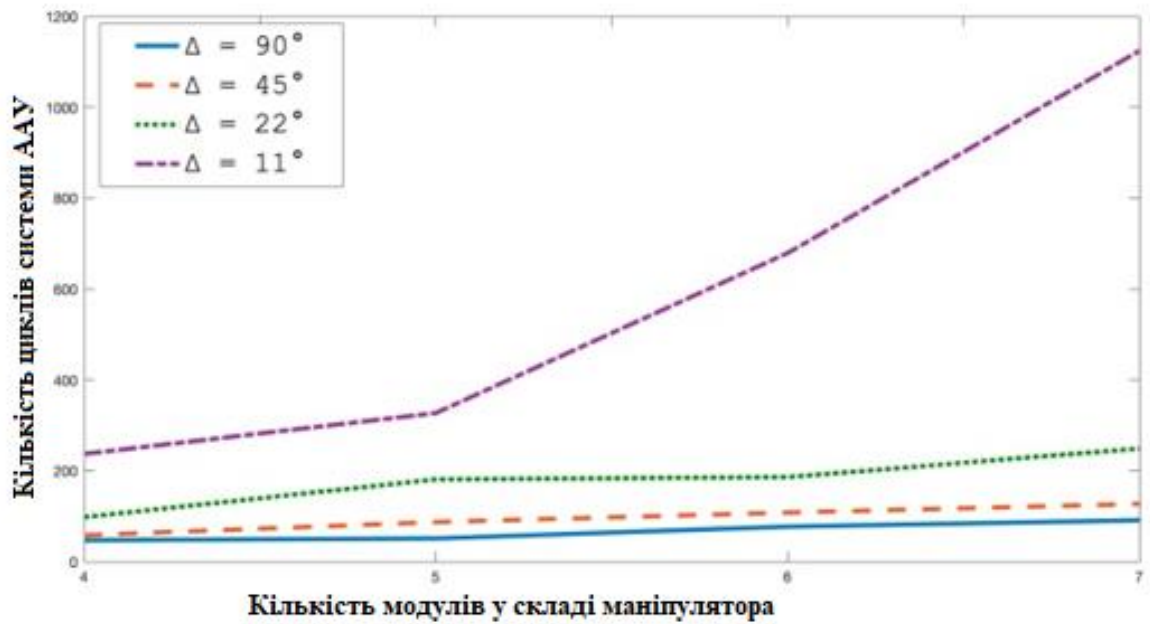


Рисунок 3.9 – Залежність часу навчання від кількості модулів у кінематичному ланцюгу при різних початкових значеннях параметра Δ (1-й спосіб).

На рисунку 3.10 зображено залежності точності досягнення цільової точки від значення параметра Δ при різній кількості модулів у складі маніпулятора.

З експериментальних даних видно, що чим менше значення величини Δ , тим вища точність управління. Однак, як показує попередній графік (рисунок 3.9), зменшення значення величини Δ призводить до збільшення часу навчання.

Різкі стрибки на графіку (рисунок 3.11) пов'язані з вибором системою однієї з дій. Коли графік йде нагору, система вибирала ті дії, які ведуть до позитивного результату, тобто зменшення неузгодженості між схватом і цільовою точкою. У разі негативних стрибків система вибирала ті дії, які збільшували це неузгодження. Однак, якщо ситуація з часом не покращувалася, система поверталася до найкращої ситуації (завдяки структурі образів) та продовжувала пошук найкращих дій.

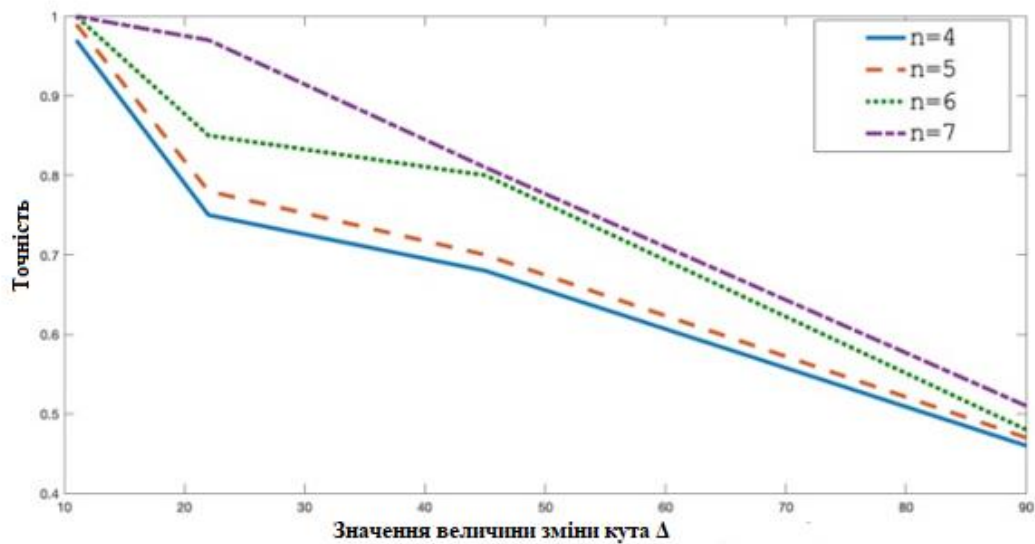


Рисунок 3.10 – Залежність точності досягнення цільової точки від значення параметра Δ при різній кількості модулів у складі маніпулятора (1-й спосіб)



Рисунок 3.11 – Залежність точності управління від часу навчання за $\Delta = 5$, $n = 5$ (1-й спосіб)

На рисунках 3.12 – 3.17 проілюстровано здатність модульного маніпулятора до самонавчання.



Рисунок 3.12 – Демонстрація здатності самонавчання модульного «s-bot»



Рисунок 3.13 – Демонстрація здатності самонавчання модульного «s-bot»



Рисунок 3.14 – Демонстрація здатності самонавчання модульного «s-bot»



Рисунок 3.15 – Демонстрація здатності самонавчання модульного «s-bot»



Рисунок 3.16 – Демонстрація здатності самонавчання модульного «s-bot»



Рисунок 3.17 – Демонстрація здатності самонавчання модульного «s-bot»

Як видно з рисунків 3.12 – 3.17, при порожній базі захвату – (БЗ), модульний «s-bot» із вихідної позиції рухається хаотично. Коли через деякий час БЗ «s-bot» вже частково заповнена знаннями, «s-bot» з цієї ж вихідної позиції відразу ж, хоча і не дуже точно, починає рухатися в напрямку цільової точки. У повністю навченому стані «s-bot» швидко і точно приходить в цільову точку.

На рисунку 3.18 та рисунку 3.19 показаний результат навчання «s-bot» із спочатку заклиненим модулем.



Рисунок 3.18 – Демонстрація результату навчання модульного маніпулятора із заклиненим модулем



Рисунок 3.19 – Демонстрація результату навчання модульного маніпулятора із заклиненим модулем

Цей модуль не може змінювати свій кут повороту, проте система не має інформації про це. У процесі свого функціонування система може спробувати повернути заклинений модуль на величину Δ , але це не дасть жодного ефекту. В результаті, незважаючи на поломку модуля, «s-bot» навчається приходити в цільову точку.

Здатність до перенавчання у початковий момент часу t_1 БЗ знань «s-bot» порожня, і він починає рухатися хаотично. На момент часу t_4 «s-bot» навчився приходити до цільової точки. Потім «s-bot» повертається в цільову точку, і імітується поломка модуля (виділений червоним кольором). Якщо тепер «s-bot» спробує прийти в цільову точку, використовуючи отримані знання, то через заклинювання модуля він промахнеться. Потім «s-bot» починає перенавчання і поступово перенавчається переміщати схоплення в цільову точку, незважаючи на вихід з ладу одного з модулів.

Другий спосіб управління модульним «s-bot» на відміну від попереднього вимагає менше пам'яті, оскільки кількість образів значно нижча. У цьому випадку «s-bot» поступово навчається виконувати дії для пересування в цільову точку. Через малу кількість образів швидкість навчання при використанні 2-го способу вища, ніж при використанні 1-го.

Як було сказано вище, дані способи управління можуть застосовуватися до модульних «s-bot» в конфігурації крокуючої платформи. У цьому завдання декомпозується на 2 етапи. Перший припускає знаходження цільового стану кінцівки, розглядаючи кінцівку як маніпулятор. На наступному етапі шукається найефективніший порядок перестановки кінцівок.

Для платформи з чотирма кінцівками, наведеної для прикладу, не всі варіанти обережної ходи є рівнозначними з точки зору підтримки стійкості. Так, при послідовному переміщенні кінцівок за схемою «1-2-3-4» зміна положення центру ваги платформи на стадії виконання 1 кроку, призводить до її перекидання. У той же час інший варіант ходи з переміщенням кінцівок за схемою «4-3-1-2» дозволяє зберегти стійкість крокуючої платформи, в процесі її руху. Оскільки існує можливість перекидання платформи, то програмне

забезпечення, яке має закладатися на борт модульної крокуючої платформи, повинно мати частково заповнену БЗ. Для цього спочатку необхідно провести навчання методом ААУ на моделях, а потім перенести отриману в результаті навчання БЗ на борт робота. Таким чином, проведені експериментальні дослідження свідчать про працездатність методу ААУ стосовно управління «s-bot» у конфігураціях «маніпулятор» та «крокуюча платформа». Показано процес самонавчання модульних роботів та перенавчання у разі виходу з ладу окремого модуля.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи було досліджено модель адаптивного управління модульними «s-bots».

А саме:

- система повинна мати 3-х рівневу ієрархічну структуру, що включає рівень планування поведінки, рівень формування траєкторій руху і приводний рівень;
- верхні два рівні розташовуються на борту одного з мехатронних модулів;
- адаптивність системи забезпечується за рахунок застосування методу автономного адаптивного управління;
- програмне забезпечення, яке заздалегідь завантажується на борт мехатронних модулів, повинно бути однотипним;
- засоби програмного моделювання, що розташовані на рівні планування поведінки, забезпечують можливість навчання та перенавчання на програмних моделях, без ризику поломки реального фізичного зразка «s-bot».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ткачов В.М., Токарев В.В., Радченко В.О., Лебедев В.О. Проблема передачі даних типу BIG DATA у мобільній системі «Мультикоптер- сенсорна мережа» / В.М. Ткачов, В.В. Токарев, В.О. Радченко, В.О. Лебедев // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №2(42). - С.154-157
2. Радченко В.О., Руденко Д.А., Ткачов В.Н., Токарев В.В. Мобильная подсистема «Мультикоптер-сенсорная сеть» в компьютерной системе хранения BIG DATA / В.О. Радченко, Д.А. Руденко, В.Н. Ткачов, В.В. Токарев // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №4(44). - С.102-105.
3. Пат. 118921 Україна, МПК H04W 64/00. Спосіб передачі цифрових даних мультикоптерною системою між сегментами розподіленої сенсорної мережі та базовою станцією / В.М. Ткачов, В.В. Токарев - № u201704085; заявл. 24.04.2017; опубл. 28.08.2017. Бюл. № 16. 5с.
4. Радченко В.А., Токарев В.В., Ткачев В.Н. Мобильная система передачи данных на базе динамически реконфигурируемых мультикоптерных устройств / В.А. Радченко, В.В. Токарев, В.Н. Ткачев // Проблеми інформатизації: тези доповідей V - наук. - техн. конф., 13 - 15 лист. 2017р. - Харків, 2017. - С.36.
5. Рубан И.В., Чурюмов Г.И., Токарев В.В., Ткачев В.Н. Функциональная стойкость универсальной мобильной реконфигурируемой системы при воздействии электромагнитного излучения высокой мощности / И.В. Рубан, Г.И. Чурюмов, В.В. Токарев, В.Н. Ткачев // Информационные технологии и безопасность: (ИТБ-2017), материалы докладов XVII Международной научно-практической конференции, 30 нояб. 2017г. - Киев, 2017. - С.205 - 210.
6. Створення науково-методичних основ забезпечення живучості мережевих систем обміну інформацією в умовах зовнішнього впливу потужного НВЧ випромінювання: звіт про НДР (заключ.) № держреєстрації

0117U003916.: Ф76/109-2017 / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки; керівник Г. І. Чурюмов. – Харків, 2017. – 116 с.

7. Ruban I.V., Churyumov G.I., Tokarev V.V., Tkachov V.M. Provision of Survivability of Reconfigurable Mobile System on Exposure to High-Power Electromagnetic Radiation / I.V. Ruban, G.I. Churyumov, V.V. Tokarev, V.M. Tkachov // Selected Papers of the XVII International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security: (ITS 2017). CEUR Workshop Processing., 30 nov. 2017 y. - Kyiv, 2017. - P. 105-111.

8. Serkov A., Kravets V., Yakovenko I., Churyumov G., Tokariev V., Nannan W. Ultra Wideband Signals in Control Systems of Unmanned Aerial Vehicles / A. Serkov, V. Kravets, I. Yakovenko, G. Churyumov, V. Tokariev, W. Nannan // The 10h IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies: (DESSERT'2019)., 5-7 june, 2019 y. - Leeds, 2019. - P.26 - 29.

9. Серков О. А., Пустовойтов П. Є., Яковенко І. В., Лазуренко Б. О., Чурюмов Г. І., Токарев В. В., Наннан Ванг. Надширокосмугові технології в системах управління мобільними об'єктами. / О. А. Серков, П. Є. Пустовойтов, І. В. Яковенко, Б. О. Лазуренко, Г. І. Чурюмов, В. В. Токарев, Ванг Наннан // Сучасні інформаційні системи. - 2019. - Т.3, №2. - С.22-27.

10. Серков О.А., Князев В.В., Лазуренко Б.О., Яковенко І.В., Чурюмов Г.І., Токарев В.В. Надширокосмугові технології в задачах забезпечення електромагнітної сумісності рухомих об'єктів / О.А. Серков, В.В. Князев, Б.О. Лазуренко, І.В. Яковенко, Г.І. Чурюмов, В.В. Токарев // Проблеми електромагнітної сумісності перспективних бездротових мереж зв'язку (EMC-2019):збірник наукових робіт четвертої міжн. наук.-техн. конф., 24 жовт. 2019 р. - Харків, 2019. - С. 55-57.

11. Кривуля Г.Ф., Токарев В.В., Щербак В.К. Моделирование компьютеризированных систем управления с использованием интеллектуальных средств / Г.Ф. Кривуля, В.В. Токарев, В.К. Щербак // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: тези доповідей 32-ї міжн. наук.-практ. конф., 24-25 жовт. 2019р. - Харків, 2019. - С. 90 - 91.

12. Krivoulya G., Tokariiev V., Iina I, Shcherbak V. Mathematical Model for Finding Probability of Detecting Victims of Man-Made Disasters Using Distributed Computer System with Reconfigurable Structure and Programmable Logic / G. Krivoulya, V. Tokariiev, I. Iina, V. Shcherbak // IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology: (PIC S&T), 06-09 oct. 2020y. - Kharkiv, 2020. - P.197 - 201.

13. Лебедев О.Г., Ткачев В.Н., Токарев В.В., Чурюмов Г.И. Темпоральная модель адаптации интегрированной информационной системы путем реконфигурации логической структуры / О.Г. Лебедев, В.Н. Ткачев, В.В. Токарев, Г.И. Чурюмов // Комп'ютерні та інформаційні системи і технології: тези доповідей другої міжн. наук. - техн. конф., 18 - 19 квітн. 2018 р. - Харків, 2018. - С.6-7.

14. Чернов Б.Д. Модель адаптивного управління модульними «s-bots» / Б.Д. Чернов // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: збірник тез доповідей, 22 вересн. 2022р. - Тернопіль, Україна – Переворськ, Польща: 2022. - випуск 70. - С.82 - 84.