МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

01.08 – МКР.1993 «С» 2022.12.30.57 ПЗ

Якубовський Максим Миколайович

2023

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

01.08 – МКР.1993 «С» 2022.12.30.57 ПЗ

Якубовський Максим Миколайович

2023

НУБіП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко – технологічний факультет

УДК 631.3:636:004.896

ПОГОДЖЕНО	**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**
Декан факультету (Директор ННІ)	**Завідувач кафедри**
механіко – технологічний факультет	**тракторів, автомобілів та біоенергоресурсів**
(назва факультету (ННІ))	(назва кафедри)
_____ **Братішко В.В.**	_____ **Калінін Є.І.**
(підпис) (ПІБ)	(підпис) (ПІБ)
“___” _____ 2023 р.	**“___” _____ 2023 р.**

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Автономний робот для виробничих процесів тваринництва»

Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

Освітня програма Агроінженерія
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

д.т.н., професор _____ Братішко В.В.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник дипломного проєкту бакалавра

д.т.н., професор _____ Калінін Є.І.
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав _____ Якубовський Максим Миколайович
(підпис) (ПІБ)

КИЇВ – 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
тракторів, автомобілів та біоенергоресурсів
д.т.н., проф. _____ **Калінін Є.І.**
(наук. ступ., вч. звання) (підпис) (ПІБ)
«___» _____ 2023 р.

З А В Д А Н Н Я

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту
Якубовському Максиму Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код, назва)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Автономний робот для виробничих процесів тваринництва»
затверджена наказом ректора НУБіП України від «30» грудня 2022р. №1993 «С»

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру: 01.10.2023
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: сучасні системи 3D зору та аналізу просторового розташування; поелементний склад систем позиціонування транспортних засобів у просторі; загальні принципи формування руху на агропромисловому виробництві

Перелік питань які потрібно розробити
Вступ. Огляд літературі і постановка завдань. Призначення та структура транспортного засобу. Математичне та комп'ютерне моделювання. Висновки.

Перелік графічного матеріалу: Принципи автоматизованого руху. Платформа – об'єкт для проведення досліджень. Динамічна модель руху засобу. Моделювання електричних компонентів засобу. Формування логічної та програмної складової. Імітаційні дослідження. Висновки.

Дата видачі завдання «09» січня 2023 р.

Керівник дипломного проєкту бакалавра _____ Калінін Є.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Якубовський М.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

НУБіП України

РЕФЕРАТ

Основна частина дипломного проекту викладена на 63 сторінках пояснювальної записки і 16 слайдах презентації та ілюстрована 46 рисунками.

Пояснювальна записка складається із вступу, 3 розділів, висновків, списку використаної літератури.

Тема дипломного проекту: «Автономний робот для виробничих процесів тваринництва».

Об’єктом дослідження є динаміка автономного робота в виробничих приміщення тваринницьких ферм та за їх межами.

Метою роботи є проектування підсистеми визначення та об’їзду перешкод, що входить до складу автономної системи керування автономним роботом.

У кваліфікаційній роботі виконано математичне моделювання транспортного засобу (виведення рівнянь руху, кінематична модель); розроблено моделі системи управління (4 моделі поведінки на нечіткому регуляторі, класифікатор поведінок на нейромережевому підході та програмному підході); виконано моделювання руху транспортного засобу із зазначенням переваг та недоліків кожного підходу в умовах розглянутої задачі.

Ключові слова: автономний робот, тваринництво, об’їзд перешкод, виробничий процес, математична модель, динаміка.

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

ЗМІСТ

ВСТУП 5
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРІ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ 6
1.1 Огляд систем керування наземними транспортними засобами 6
1.2 Огляд систем виявлення, цілевказівки та об’їзду перешкод 11
1.3 Постановка задачі 23
РОЗДІЛ 2 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА СТРУКТУРА ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ 24
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП’ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ 26
3.1 Модель руху 26
3.1.1 Динамічна модель 28
3.1.2 Математична модель двигуна 33
3.2 Модель системи управління 37
3.2.1 Структура системи управління 37
3.2.2 Формування апаратних вимог 39
3.2.3 Модель поведінки «рух до цілі» 44
3.2.4 Модель поведінки «рух вздовж стінок» 50
3.2.5 Модель поведінки «рух у коридорі» 53
ВИСНОВКИ 58
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 59

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

ВСТУП

Тематика автоматичних систем управління набирає популярності протягом останніх десяти років.

Після літературного та патентного огляду було виконано математичне моделювання транспортного засобу, що включає: модель руху, кінематичну модель транспортного засобу та її зв'язок із математичною моделлю двигунів. Додатково проводилася оптимізація кількості ультразвукових датчиків по можливості проїзду місць з близьким розташуванням перешкод.

Після того, як були сформовані апаратні вимоги, проводилася розробка підсистеми об'їзду перешкод, а саме: формувалася кожна з поведінок; розглядалися варіанти побудови класифікатора поведінки.

Враховано, що існує два основних підходи до проектування «класифікатора поведінки»: програмний підхід та підхід на основі нейронної мережі.

Кожен із підходів було реалізовано та проведено моделювання роботи підсистеми визначення та об'їзду перешкод у невизначеному навколишньому середовищі. Ефективність роботи кожного з алгоритмів оцінювалася запровадженими критеріями (пройдений шлях, час виконання алгоритму). Після завершення моделювання було зроблено відповідні висновки щодо ефективності роботи підходів щодо кожного з параметрів.

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ

1.1 Огляд систем керування наземними транспортними засобами

В рамках поточної роботи ставиться завдання розробки модуля визначення та об'їзду перешкод, що є елементом автоматичної системи керування транспортним засобом.

Безпілотний автоматично керований транспортний засіб повинен рухатися пересіченою місцевістю за транспортним засобом лідером на заздалегідь визначеній дистанції. Рух пересіченою місцевістю накладає додаткові обмеження на керування, що пов'язані з неможливістю подолання перешкод транспортним засобом (необхідний об'їзд).

На підставі огляду вітчизняної та закордонної літератури було виявлено, що тема набирає актуальності протягом останніх восьми років.

Новизна поставленої задачі полягає в тому, що розробляється система управління для руху на пересіченій місцевості (в межах тваринницького комплексу), тоді як великі концерні Audi, BMW, Cadillac тощо вирішують завдання щодо доріг загального користування.

У 90-х роках XX століття аварія на Чорнобильській атомній електростанції здійснила потужний поштовх екстремальної робототехніки. Найбільш відомі робочі варіанти на ЧАЕС були: робот ДУА ТР-3(4), призначений для вибурювання проб у приміщеннях (глибина проникнення радіації); робот «Магнітохід», призначений для руху по металевих стінах Саркофагу; спеціалізований транспортний робот (СТР-1), Клин-1 та Клин-2, призначені для попередньої зачистки місцевості перед дослідженням; робот-Ч-ХВ та робот-Ч-ХВ-2, що призначені для зачистки та розвідки зараженої місцевості; тяжкі роботи МF-2 і МF-3, поставлені з Німеччини, вийшли з ладу під впливом іонізуючого випромінювання.

Найбільш простими за структурою та дешевими за вартістю є роботи, які керуються за допомогою людини по дротовому або бездротовому каналу

зв'язку. При такому управлінні характеристики руху, безпеки та досягнення мети повністю залежать від майстерності управління оператора робота.

Однак останні 20 років все більшу популярність почали набирати автоматичні системи управління. Слово «автоматичний» говорить про те, що управління здійснюється без участі людини.

Автоматичні системи керування впроваджуються в транспортну інфраструктуру та використовуються для керування автомобілями та для допомоги водію на дорозі.

У [1] найбільш широко розкрито тему автономного управління, наведено основні компанії, що розробляють інтелектуальні транспортні засоби, розглянуті існуючі системи, що забезпечують безпеку автономного руху і піднімаються теми перспектив розвитку автономного управління та ймовірні труднощі, з якими доведеться зіткнутися при вирішенні питання автоматичного управління. Так, у статті були представлені такі компанії, як Continental, що розробляють автоматичні системи управління. Наприклад: адаптивний круїз-контроль і так званий «гальмівний помічник». Також автором була представлена компанія Google з проектом Google Car, родзинкою якого є лазерний сканер, що обертається та надає можливість відображати 3-вимірну картину оточення автомобіля. Як найвідоміші системи для підвищення безпеки руху автомобіля на дорозі автор перерахував: активна система контролю «мертвих» зон (стеження за смугами руху); система адаптивного круїз-контролю Mercedes-Benz (підтримка бажаної швидкості та дистанції до транспорту, що йде попереду); система нічного бачення Night View Assist Plus (для можливості побачити людей у темряві на узбіччі); система контролю ступеня втоми (знижує ризик секундного засипання).

У [2] автор надає визначення автономності мобільних роботів з погляду вчених, а саме:

- Antsaklis PJ. пропонує визначення: автономні системи управління повинні добре функціонувати за умови наявності невизначеності як самих

систем, так і довкілля протягом тривалих періодів часу; вона має бути здатною компенсувати збої системи без зовнішнього втручання;

- Goodrich M.A. дає визначення автономності мобільного робота як рівень його взаємодії з оператором – чим абстрактніші завдання, що видаються оператором роботу, тим більше автономен робот;

- Lampe Alexandre визначає автономність як здатність робота чітко реагувати на зміни навколишнього середовища.

Єрмолов І.Л. визначив 3 види автономності за формою забезпечення: автономність інформаційна; інтелектуальна автономність; автономність матеріально-технічна.

Автономність інформаційна характеризує здатність суб'єкта отримувати інформацію про себе і стан навколишнього середовища без безпосередньої участі інших суб'єктів і суб'єктів вищого рівня ієрархії.

Автономність інтелектуальна (її також називають автономністю управління) характеризує здатність суб'єкта приймати рішення в залежності від наявного завдання, а також стану самого суб'єкта та навколишнього середовища без безпосередньої участі у прийнятті рішення інших суб'єктів та, насамперед, суб'єктів вищого рівня ієрархії.

Автономність матеріально-технічна характеризує здатність суб'єкта самостійно виконувати функціональні завдання без отримання додаткових матеріально-технічних засобів від інших дружніх суб'єктів та, насамперед, суб'єктів найвищого рівня ієрархії.

У [3] перераховані основні сфери застосування інтелектуальних технологій: управління рухом автономних транспортних засобів та роботів у середовищі з перешкодами; системи управління поведінкою; і інтелектуальні системи розпізнавання образів, мовлення, тексту тощо.

Автор статті ділить інтелектуальні системи на: експертні системи; системи на основі продукційних правил; фреймоподібні структури; нечітка логіка; нейронні мережі; асоціативна пам'ять.

НУБіП України

У розумінні автора, інтелектуальна система – це технічна чи програмна система, здатна вирішувати завдання, які традиційно вважаються творчими, що належать конкретній предметній галузі, знання про яку зберігаються в пам'яті такої системи. Структура інтелектуальної системи включає три основні блоки – базу знань, механізм виведення рішень та інтелектуальний інтерфейс.

Інтелектуальної системою у техніці називають системи, які працюють за жорстко заданою програмою (циклограмою), а приймають рішення з урахуванням закладених знань, тобто правил, що регламентують поведінку системи у різних ситуаціях. За потреби система може містити правила щодо створення нових правил. Тим самим можна реалізувати процес самонавчання системи. Власне, ІС є програмним забезпеченням, реалізованим з урахуванням спеціальних алгоритмів.

Завдання безпечного руху з бездоріжжя вирішувалося в [4] компанією VisLab, Італійська компанія, яка розробила систему керування автомобілем на базі автомобіля типу Minivan. Основним недоліком проекту є висока вартість апаратури, що використовується для забезпечення руху (4 лазерні сканери, 7 камер та для аналізу 3 комп'ютери). Цільовказівка автомобіля типу Minivan здійснювалася з провідного автомобіля як мітки на карті. За відсутності автомобіля лідера та міток, автомобіль не рушить з місця.

Для вирішення задачі проектування автоматичної системи було розглянуто основні підходи до вирішення. У статті [5] йдеться про дроблення завдань глобального цілезазначення та розв'язання задачі локальної траєкторії. Інакше кажучи, вся система ділиться на 2 підсистеми: підсистему вказівки цілі; підсистему руху до цілі з урахуванням зовнішніх (динамічно змінних) впливів.

Є дуже багато статей та робіт, пов'язаних з об'їздом перешкод. Найбільш розвинені у цій галузі країни заходу. Ними були вивчені методи обходу/об'їзду перешкод за допомогою апарату нечіткої логіки. Також були спроби реалізації таких систем за допомогою програмного підходу

(необхідність роботи з детермінованими зовнішніми умовами), але це дало не дуже добрі результати з точки зору оптимальності об'їзду перешкод. При використанні апарату нечіткої логіки траєкторія руху транспортного засобу виявилася плавнішою, а отже і менш енерговитратною. Тому цей метод зараз застосовується повсюдно, якщо є завдання об'їзду перешкод.

Під час огляду літератури було виявлено основні методи та підходи для визначення цілі: рух по заданій траєкторії; рух по азимуту (координати цілі відомі); рух по картині (мітці).

Рух по заданій траєкторії є найпростішим і надійним методом управління, оскільки заздалегідь відомі всі точки траєкторії. Даний метод широко використовується в промисловості та автоматизованих складах, де на шляху не виникає перешкод, і немає необхідності використовувати складніші системи.

Рух по азимуту характеризується постійним коригуванням положення транспортного засобу щодо цілі та глобальної системи координат. Цей підхід передбачає, що у будь-який час відомі координати цілі і транспортного засобу щодо глобальної СК.

Рух по картині (азимуту) – це підхід, який складніший за перші два, але це сильно розширює область використання даного підходу. Суть його полягає в тому, що за допомогою якогось засобу стеження можна визначити і відстань до цілі та її координати щодо транспортного засобу.

Найбільшого поширення набули методи технічного зору, що дозволяють за допомогою камер спостереження здійснювати стеження та розпізнавання об'єктів з відеоінформації.

З усього вищесказаного випливає, що необхідно створити систему, яка керувала б транспортним засобом виходячи з даних, отриманих з відеокамери і даних, на підставі яких забезпечується подолання перешкод (поділ на 2 підсистеми).

НУБіП України

1.2 Огляд систем виявлення, цілевказівки та об'їзду перешкод

Розглянемо найпоширеніші підходи до проектування нечітких регуляторів з метою об'їзду перешкод та досягнення цілі.

У статті [6] проведено великий огляд алгоритмів пошуку шляху. Автор перерахував найпоширеніші алгоритми для пошуку шляху в заздалегідь відомому оточенні. Перерахував такі алгоритми як: алгоритм A*; алгоритм Дейкстри; використання графів зв'язку; алгоритм із використанням потенційного поля тощо. Кінець кінцем всі представлені алгоритми пошуку шляху зводяться до двох алгоритмів: A* та Дейкстри.

Далі автор перейшов до опису алгоритмів, які використовуються під час пошуку шляху у невідомому оточенні: алгоритм повороту (Bug); Bug1; Bug2; Tangent Bug. Перелічені алгоритми використовуються при програмному підході до пошуку шляху у невідомому оточенні. Алгоритми представлені у послідовності їх створення і тому є модифікацією попередньої. Основними їх недоліками є складність організації, не завжди правильний результат (автор ставив завдання найкоротшого шляху), а іноді алгоритми й не знаходили шляху до цілі. Перелічені алгоритми спрямовані на об'їзд широкої перешкоди.

Далі автор розглядає системи об'їзду перешкод на основі нечіткої логіки, до того ж не диференціюючи операції об'їзду перешкод та руху до цілі. Траєкторія руху, що отримується з використанням нечіткої логіки, більш згладжена, ніж траєкторія, що отримується за програмного підходу. Це говорить про більшу ефективність та економічність ресурсів під час руху.

Говорячи про економічність та ефективність управління, автор статті [7] спроектував регулятор, принцип роботи якого заснований на задачі про зворотний маятник. Стратегія управління полягає в наступному: необхідно коригувати положення маятника у просторі так, щоб він залишався у стані рівноваги. Щодо завдання прямування по заданому шляху, необхідно

керувати роботом таким чином, щоб він якнайменше відхилявся від заданої траєкторії руху. Пояснення вищесказаного відображені на рис. 1.1.

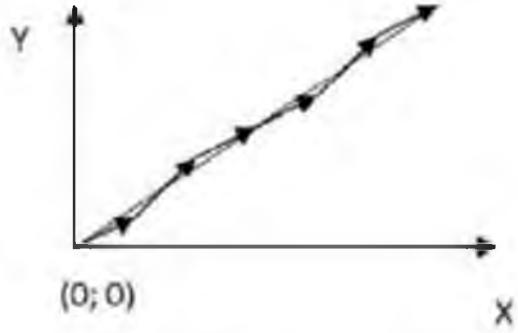

Рисунок 1.1 – Рух траєкторією

За задану траєкторію руху можна взяти найкоротший шлях від початку руху до цілі, а відхилення виникатимуть через об'їзд перешкод. При цьому автором, при проектуванні даної системи, було використано 2 нечіткі регулятори: регулятор для об'їзду перешкод; регулятор для проходження по заданому шляху. Такий підхід спрощує структуру системи управління, але звужує сферу застосування. Очевидно, що така система може повноцінно працювати лише за невеликих і простих перешкод, які можна просто об'їхати.

Про подолання складніших перешкод буде сказано далі. Докладніше структура розробленої системи розкрита у статті [8]. Подано формули для обчислення цільового спрямування та коригування при об'їзді перешкод. Описано базу правил, і терм – множину нечіткого регулятора для об'їзду перешкод.

Так само цікавий підхід до проектування за допомогою електронного компасу описаний у джерелі [9]. На роботі встановлено 10 ультразвукових датчиків, здатних оцінювати область в 180°, а також є електронний компас, за малими відхиленнями якого визначається відносне положення робота. Для розрахунку траєкторії пройденого шляху на двигунах є енкодери. Для управління роботом використовується нечітка логіка та нейронна мережа.

Основним недоліком такої системи є неможливість її використання на пересіченій місцевості, оскільки можливе пробуксування коліс робота, що призведе до помилкової побудови траєкторії та відхилення від курсу. Доцільно використовувати електронний компас у зв'язці із системою глобального позиціонування.

Під час руху транспортного засобу так само має вирішуватися завдання проходження за ціллю на певній відстані. У джерелі [10] автор сформував завдання побудови алгоритму нечіткого автоматичного регулювання між двома об'єктами (транспортами), що рухаються в один бік. Далі автор ввів лінгвістичні змінні (відстань і відносна швидкість руху транспортного засобу), побудував функції приналежності та сформував базу правил з урахуванням уникнення аварійної ситуації навіть при різкому гальмуванні транспортного засобу, що йде попереду.

Розроблений нечіткий алгоритм було реалізовано за допомогою системи CodeSys.

Одним із етапів виконання роботи є представлення математичної моделі об'єкта. Для моделювання руху транспортного засобу у заданому полі Matlab необхідно забезпечити розпізнавання віртуальних датчиків віртуальних перешкод. Інакше висловлюючись, необхідно емулювати сигнали з датчиків. Автор статті [11] представив область для дослідження датчиків у вигляді обраної кількості секторів, що спростить емуляцію сигналів із датчиків. Крім розбиття на сектори у статті представлені структури двох систем на нечіткій логіці.

Кожен створений сектор сканує свою частину області перед роботом. Відмінність двох систем полягає в тому, що в першій системі для кожного сектора проводиться фазифікація та логічний висновок, а дефазифікація відбувається 1 раз на підставі отриманих сигналів з датчиків (фазифікація локальної карти території). У другій системі послідовність дій: фазифікація, логічний висновок і дефазификация проводяться на кожному за секторів (визначення небезпеки напрямів переміщення).

Достоїнствами першої системи є її розширюваність, але вона страждає на швидкодію. Перевагами другої системи є її швидкодія, але тут страждає точність і при зростанні кількості зон необхідна корекція в основі правил.

При вивченні питання проектування нечіткого регулятора для руху в невизначеному середовищі з'ясувалося, що в базі знань деякі правила можуть давати протилежні результати, що призводить до небажаних наслідків (зіткнення з перешкодою, відхилення від оптимальної траєкторії руху). Такими правилами може бути: правило, що відповідає за рух до цілі; правило об'їзду перешкод.

Розв'язок цієї ситуації ліг в основу джерела [12]. Автор говорить про те, що необхідно розмежувати область дії в тій чи іншій ситуації та пропонує виставити відповідні пріоритети на ті чи інші правила, тоді буде активізовано правило з найвищим пріоритетом, а правила з меншими пріоритетами будуть ігноровані, але це не завжди призводить до позитивного результату.

Найбільш ефективне рішення було запропоновано авторами статті [13]. В якості мобільного робота вони розглядали літальний апарат і вирішували завдання управління у 3-мірному просторі. Принципово новим рішенням є поділ завдання руху до цілі та об'їзду перешкод на більш дрібні завдання. Це призводить до думки про проектування системи управління з урахуванням поведінкового підходу. Так і вчинили автори цієї статті. Було вироблено 4 поведінки: «рух до цілі», «рух уздовж стіни», «обхід перешкоди», «надзвичайна ситуація». Кожна поведінка реалізована у вигляді нечіткого регулятора. Кожен нечіткий регулятор має свої змінні, правила та функції приладдя. Система була названа «нечіткий планувальник» (НП). Робота НП зводилася до циклічного виконання операцій: виявлення перешкод; визначення неузгодженості орієнтації робота до цілі; вибір поведінки (координатор поведінки); вироблення керуючих сигналів на основі обраної поведінки.

Так було вирішено проблему протиріччя двох правил. Введення кількох нечітких регуляторів дасть можливість коригувати поведінку робота в кожній із ситуацій.

Ті ж автори в статті [14] адаптували цю систему і для наземного мобільного робота, навівши внутрішню структуру нечіткого регулятора для поведінки «обхід перешкод».

Наприкінці статті подано порівняльні характеристики з іншими алгоритмами: метод потенційних полів; нейромережевий гібридний метод. Метод управління із застосуванням нечітких систем показав мінімальний час виконання та мінімальну довжину траєкторії.

Результати моделювання предстаавлені на рис. 1.2.

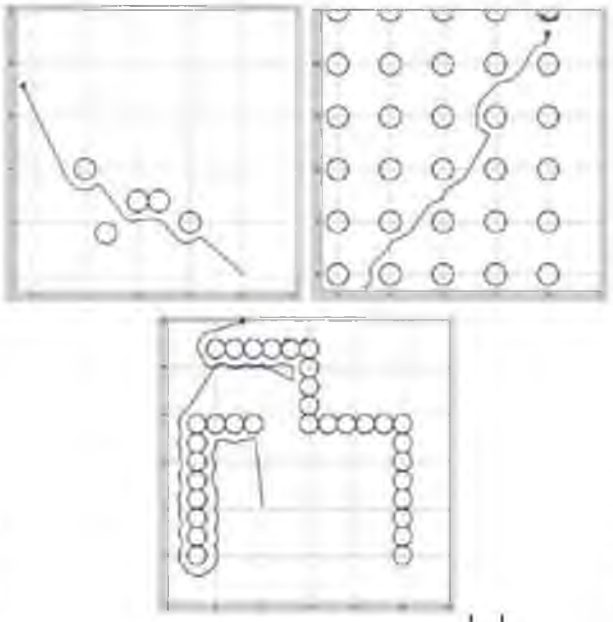

Рисунок 1.2 – Траєкторія руху

Продовжуючи тематику автоматичного управління мобільним роботом, тими самими авторами було випущено статтю [15], яка докладно розкриває і описує структуру кожного з 4 розроблених поведінок починаючи з формування функції власності і до бази правил.

Автор статті [16] проектував систему на позиційно-траєкторному та реактивному управлінні, але зіткнувся з наступними обставинами, що заважають роботу досягти цілі: глухий кут, пов'язаний з локальними мінімумами; відсутність проходу між близько розташованими по

відношенню один до одного перешкодами; коливання поруч із перешкодами чи у вузьких проходах.

Вихід із ситуації було знайдено за допомогою апарата нечіткої логіки. Було створено гібридну систему, в якій так само реалізовувалося позиційно-траєкторне управління, але для уникнення зіткнень використовувався нечіткий регулятор. Це дозволило благополучно виходити з області локального мінімуму та досягати цілі. Розробнику вдалося обійти Г- та U-подібні перешкоди. Результати моделювання відображені на рис. 1.3 та 1.4.

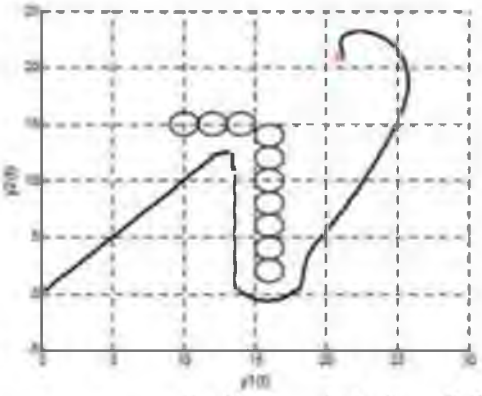

Рисунок 1.3 – Г-подібна перешкода

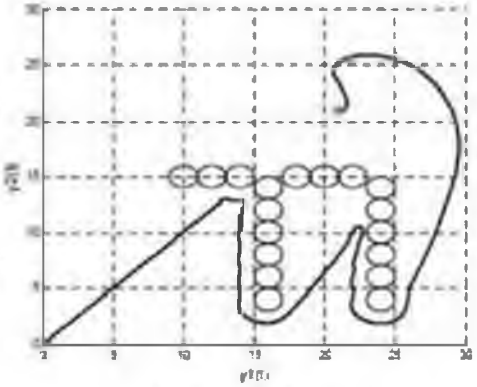

Рисунок 1.4 – U-подібна перешкода

Нечітка логіка сама по собі має широке поняття, але в рамках, в яких ми розглядаємо це апарат, що дозволяє на підставі деяких вхідних величин, формувати усвідомлені вихідні величини. Процес отримання вихідних величин із вхідних є нечітким алгоритмом. У статті [17] описуються найбільш використовувані алгоритми: Mamdani, Tsukamoto, Sugeno, Larsen. При проектуванні автономних систем найчастіше використовують

алгоритми Mamdani та Sugeno. Ці алгоритми відрізняються тим, що процес отримання вихідного сигналу та дефазифікація відбуваєтьея по-різному.

Доречно сказати про дослідження, які проводилися за кордоном. Результати робіт описані у статті [18]. У ній порівнюються алгоритми Mamdani та Sugeno за допомогою моделювання руху робота.

У ділянку руху робота поміщаються різні перешкоди: стіна, сходи, не рівна поверхня, кути. На рис. 1.5 та 1.6 відображено результати моделювання руху алгоритмів Mamdani та Sugeno відповідно.

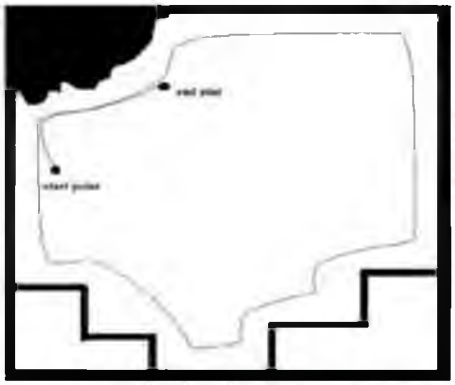

Рисунок 1.5 – Алгоритм Mamdani

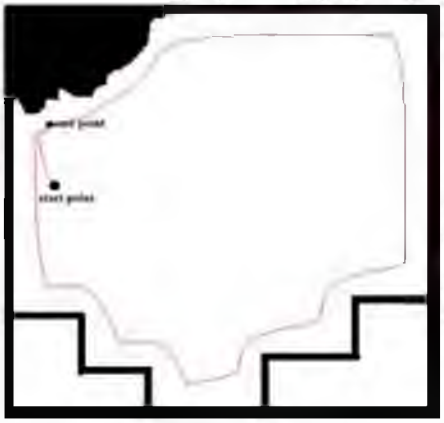

Рисунок 1.6 – Алгоритм Sugeno

За результатами моделювання було зроблено висновок, що алгоритм Sugeno більш точно повторює контури перешкоди, чого не можна сказати про алгоритм Mamdani, але час, який знадобився для досягнення необхідної мети алгоритму Sugeno більше, ніж у Mamdani. Ключовим фактором обробки зовнішньої інформації мобільного робота є швидкодія та простота

НУБіП України

реалізації на «залізі». Це пояснює те, що алгоритм Mamdani використовується частіше за інші алгоритми.

За кордоном виконуються аналогічні дослідження, але питання керування транспортним засобом у невідомому середовищі розглядається під іншими кутами та спрямоване на всебічне поліпшення якості керування з погляду гладкості та мінімізації довжини траєкторії.

Найбільш прості із систем представлені в джерелах [19], [20]. У джерелі описується система на нечіткому регуляторі, на вхід якої подаються сигнали з 3 УЗ датчиків, а на виході формується кут повороту рульового колеса при постійній швидкості руху робота. Перевагою такої системи є те, що функцій приналежності, що описують сигнали з датчиків всього 2, а правил 8, ціль досягається. У джерелі [20] ускладнення системи керування відбувається поступово. Спочатку реалізується функція руху до цілі, потім об'їзд перешкод. Особливістю даної роботи є те, що автор спробував застосувати цю саму систему для навколишнього середовища, що динамічно змінюється. Результат показав, що в 50% випадків робот врізався в об'єкт, що рухається. Це відбувалося через те, що робот починав рухатися у той самий бік, як і динамічний об'єкт, отже, потрібен додатковий аналіз руху перешкоди відносно робота.

Не менш цікавий підхід був винайдений автором статті [21]. Він підійшов до питання проектування системи з погляду поведінкового підходу, виробивши 3 різних поведінки: рух вздовж правої стінки; рух вздовж лівої стінки; рух до цілі.

Раніше в статтях для поділу поведінки використовувався координатор поведінки, який вирішував, яку з поведінки необхідно активувати.

Відмінністю від інших підходів даного автора є те, що для управління роботом у будь-який момент часу будуть використовуватися всі 3 поведінки, а як координатор поведінки використовуватиметься ще один нечіткий регулятор, який кожній поведінці присвоюватиме коефіцієнт (як

сильно дана поведінка бере участь в управлінні) . Результати показали, що цей підхід працює. Траєкторія руху відображена на рис. 1.7.

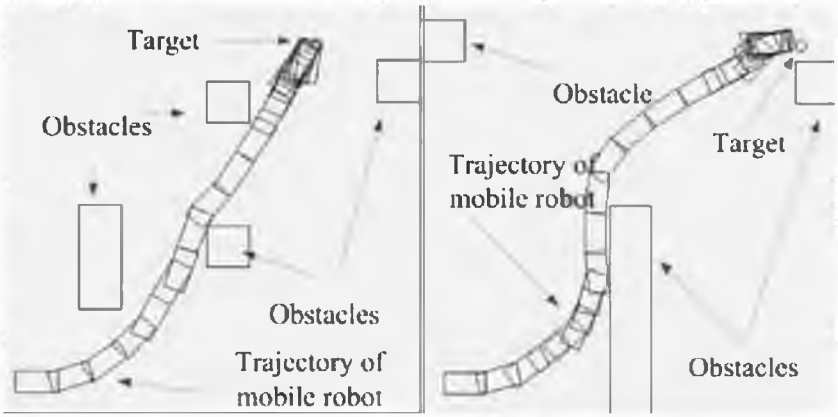

Рисунок 1.7 – Траєкторія руху робота

Також виконувались роботи, схожі за змістом із роботою, описаної у статті [7]. Автор статті [22] намагається покращити якість управління шляхом запровадження кінематичної та динамічної моделі робота. Робота полягає в тому, що робот повинен рухатися якомога ближче до заданої траєкторії та шляхом введення нечіткого регулятора компенсувати решту не врахованих параметрів робота. Результати показали, що помилка відстеження траєкторії зменшилась.

Найбільш просунуті підходи до управління було використано авторами статей [23], [24].

Автор статті [23] розробив гібридну систему управління, в якій за допомогою нейронної мережі отримав функції приналежності та базу правил для нечіткого регулятора, який у свою чергу і керував процесом руху. Перевагою даного підходу є те, що формується мінімальна кількість функцій належності та правил, а це говорить про те, що зросте швидкість виконання алгоритму нечіткої логіки на контролері.

Близька за змістом стаття [24]. У ній автор порівнює дві системи управління: на нечіткому регуляторі; на нейро-нечіткому регуляторі.

Область руху робота була розбита на квадрати, зайняті осередки мали значення «true» (перешкода), вільні «false». Після моделювання з'ясувалося, що система на нейро-нечіткому регуляторі показала кращі результати, ніж

на звичайному нечіткому регуляторі, особливо у тих місцях, де проїзд вузький. У другому випадку (тільки нечіткий регулятор) траєкторія вийшла більш згладженою, що збереже ресурс приводів.

На рис. 1.8 та 1.9 показані траєкторії руху.

Рисунок 1.8 – Система на нечіткому регуляторі

Рисунок 1.9 – Система на нейро-нечіткому регуляторі

Крім нечіткого і нейро-нечіткого регулятора є також GA-Fuzzy, PSO-Fuzzy алгоритми. Далі про них і йтиметься. Автор джерела [25] виконав величезну роботу, порівнюючи між собою 4 перераховані вище алгоритми. GA-Fuzzy – гібрид алгоритму нечіткої логіки та генетичного алгоритму. PSO-Fuzzy – гібрид методу рою частинок та нечіткого алгоритму.

Емуляція роботи алгоритмів проводилася у 4 сценаріях (різне положення перешкод). Результати показали, що нечіткий алгоритм кращий за всіх інших з точки зору мінімізації енергії повороту (немає різких поворотів). GA–Fuzzy показав найменший час руху до цілі. PSO-fuzzy та neuro-fuzzy виявилися приблизно однаковими за характеристиками. В результаті виконання роботи автори дійшли висновку, що нечіткий

регулятор (не гібрид) краще проявить себе в реальних умовах, а решта – в умовах емуляції (оптимізація та висока швидкість обчислень).

Так само велика робота була проведена авторами статті [26]. У ній розглядався рух робота у кімнаті. На стелі кімнати були розміщені 2 Kinect камери, що дають можливість отримувати зображення з кожної з них і глибину до об'єктів, що розглядаються. За допомогою цих камер оператор може ставити ціль. Отримане зображення обробляється генетичним алгоритмом і вибудовується траєкторія руху робота, а нечіткий регулятор виконує функцію руху по траєкторії. Таку систему можна використовувати поза кімнатою, але потрібна додаткова доробка та попереднє картографування місцевості, наприклад, з коптера. Ця система не зовсім автономна, оскільки аналіз зображення здійснюється поза роботом. Удосконалення алгоритму та збільшення обчислювальної потужності із зменшенням займаних обсягів дасть можливість виконувати завдання і на роботі. На рис. 1.10 синьою лінією відображається шлях, згенерований алгоритмом, а червона та зелена точка позначає початкову та кінцеву точку руху відповідно.

Рисунок 1.10 – Траєкторія руху

Автор цієї статті зачіпає досить велику область дослідження, починаючи опис зі структур інтелектуальних систем автоматичного управління, основних підходів до формування бази правил, а також функцій належності, більш докладно розглядає апаратну частину (контролери, на яких можлива реалізація алгоритму).

Алгоритми можна реалізувати на контролерах, що мають апаратну підтримку нечіткої логіки (Motorola 68HC12, ST52 Dualogic (STMicroelectronics)), але такі контролери часто важко знайти, тому використовуються звичайні 8-бітні контролери сімейства AVR, PIC, MSP, ASP. Для такого випадку вже написано спеціальні бібліотеки та розроблено програмні продукти з можливістю трансляції алгоритму в код мікроконтролера. Єдиним недоліком використання контролерів загального призначення замість спеціалізованих є зниження швидкодії виконання алгоритму.

Для розв'язання задачі руху транспортного засобу до цілі було використано розроблену підсистему локального позиціонування (система цілевказівки). На вхід цієї підсистеми надходить відеосигнал з камери на борту транспортного засобу, який надалі аналізується та виявляється інформація про розташування цілі у глобальній системі координат.

В основі роботи підсистеми локального позиціонування (далі ПЛП) закладено алгоритми розв'язання задачі розпізнавання образів. Нехай $x \in X$, де x – образ об'єкта для розпізнавання серед множини об'єктів X. Кожен об'єкт множини X має деякий набір характерних ознак, які мають кількісну оцінку за протяжністю, площею, кутовим положенням, кольором. Перераховані характеристики залежать від зовнішніх умов, наприклад, геометричні характеристики визначаються засобами вимірювання, роздільною здатністю зображення, якістю оптики, умовами руху, а колір об'єкта залежить від умов його освітленості. Для оптимізації алгоритмів розпізнавання за швидкістю й надійності необхідно розбити множину X на класи образів, які у свою чергу теж є множиною $A = \{a_1, a_2, \ldots, a_m\}$, що містить не менше 2-х елементів: $m \geq 2$. До кожного класу a_i, $i = \overline{1,m}$ слід визначити підкласи ознак деталізації об'єктів. Для оцінки впливу зовнішнього середовища на інформативні ознаки об'єктів розпізнавання вводиться множина $B = \{b_1, b_2, \ldots, b_k\}$, що складається з k елементів. Фактично множина

дозволяє враховувати умови експлуатації системи розпізнавання образів, наприклад, через типологічні угруповання або кількісні оцінки: день, ніч, сутінки або їх еквіваленти через освітленість. Вирішальне правило для встановлення взаємозв'язку між реальним об'єктом їх множини X і його образом з множини A за наявності умов з множини B буде виглядати так:

$$\Psi : X \xrightarrow{B} A. \quad (1.1)$$

Для оцінки ефективності алгоритму розпізнавання доцільно вводити цільову функцію, що оцінює близькість об'єктів-претендентів на відповідність будь-якому класу (1.2).

$$J : X \times A \to R. \quad (1.2)$$

Якщо в якості цільової функції вибрати квадратичну функцію, то її реалізація для порівняння двох зображень може призвести до надмірно великих часових витрат, що позначиться на швидкодії ПЛП. Простіший, але не менш ефективний варіант цільової функції представляє кореляційна функція.

1.3 Постановка задачі

Ставиться завдання руху з об'їздом статичних перешкод. Ключовими елементами системи є: підсистема визначення цілі (ПЛП) та підсистема визначення та об'їзду перешкод.

Основними завданнями для підсистеми визначення та об'їзду перешкод є:

- побудова математичної моделі об'єкта управління (модель руху та кінематична модель);
- формування структури системи управління з урахуванням умов функціонування транспортного засобу;
- моделювання системи управління;
- моделювання спроектованої підсистеми з об'єктом управління, виявлення недоліків.

НУБіП України

РОЗДІЛ 2 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА СТРУКТУРА ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

Об’єктом, відносно якого розроблятиметься автономна система управління, є базовий транспортний засіб, що відображено на рис. 2.1.

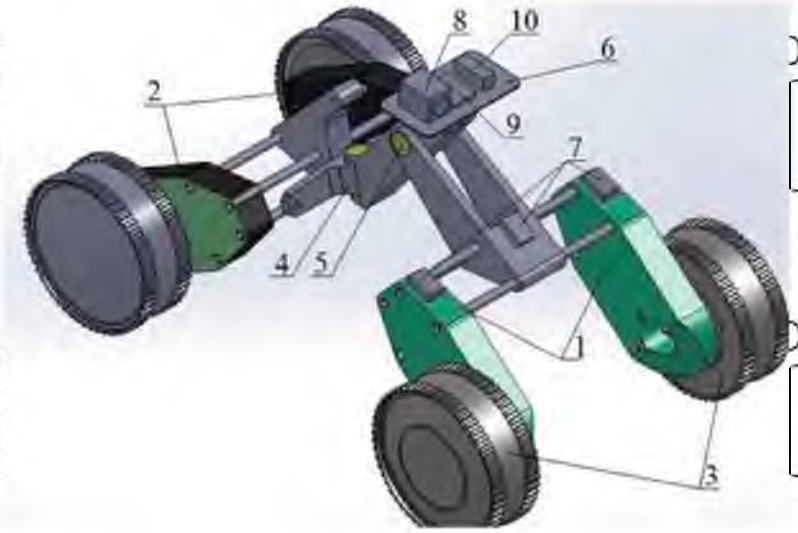

Рисунок 2.1 – Об’єкт автоматизації

На рис. 2.1 представлені основні елементи конструкції: позицією 1 позначені передні кронштейни; позицією 2 позначені задні кронштейни; позицією 3 позначені ведучі колеса; позицією 4 та 5 позначені шарніри; позицією 6 позначений вимірювальний блок, що включає камеру спостереження, лазерний датчик та акселерометр; позиція 7, 3 ультразвукових датчика виявлення перешкоди перед колесами та перед транспортним засобом; у позиції 8 розміщується камера спостереження; у позиції 9, акселерометр; в позиції 10 лазерний датчик, необхідний для більш точного дослідження місцевості.

У переднього кронштейна всередині є плата керування двигуном.

Шарнір 4 дозволяє транспортному засобу змінювати свою конфігурацію, а саме обертання передньої півнісі відносно задньої на кут нишпорення, а шарнір 5 – на кут тангажу.

Ведучі колеса поз. 3 з рис. 2.1 мають 2 вентильних двигуна ДВМ100.12.

НУБіП України

Призначення системи керування транспортним засобом полягає: у забезпеченні автоматичного руху транспортного засобу; у безпечному русі пересіченою місцевістю з об'їздом локальних перешкод; в автоматичному стеженні та русі за лідером; у витримуванні заданої дистанції між транспортним засобом-лідером та самим транспортним засобом.

Основною метою створення автоматизованої системи управління є: підвищення рівня безпеки руху транспортного засобу завдяки виключенню людського фактора (втома, знижена концентрація уваги та інші фактори); виключення людини з керування транспортним засобом дозволяє заощадити кошти на оплату його праці; забезпечення зниженої витрати енергії, що витрачається на рух, шляхом більш плавного управління, з боку електроніки.

Цей транспортний засіб може бути використаний: у сільськогосподарській галузі (на тваринницьких фермах); за потреби транспортування великих вантажів (наприклад: роздача кормів на тваринницькій фермі).

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

НУБіП України

3.1 Модель руху

Камера необхідна для стеження за навколишнім середовищем. Акселерометр необхідний для визначення характеристик руху. Лазерний датчик необхідний для більш точної розвідки території. Всі перераховані вище елементи розташовані на поворотній платформі, це дозволяє розширити кутовий діапазон стеження за ціллю.

При моделюванні руху транспортного засобу воно розглядатиметься як матеріальна точка з масою, тому вимірювання, які будуть отримані з акселерометра, не характеризуватимуть фактичні прискорення, оскільки акселерометр розташований не в центрі мас транспортного засобу.

Методика перерахунку характеристик руху від однієї точки до іншої викладена в [3]. Спираючись на неї, перерахуємо значення, які отримують з акселерометра.

На початковому етапі приймемо такі вихідні передумови: транспортний засіб є твердим тілом; рух розглядається в інерційних системах координат $X_i Y_i Z_i$ початок яких міститься в центрі Землі; динамічні рівняння руху транспортного засобу записуються в проекціях на осі декартової опорної системи координат, початок якої міститься в точці полюса (номінальний центр мас), а напрямки збігаються з напрямками головних осей інерції.

Системи координат, що розглядаються, відображені на рис 3.1.

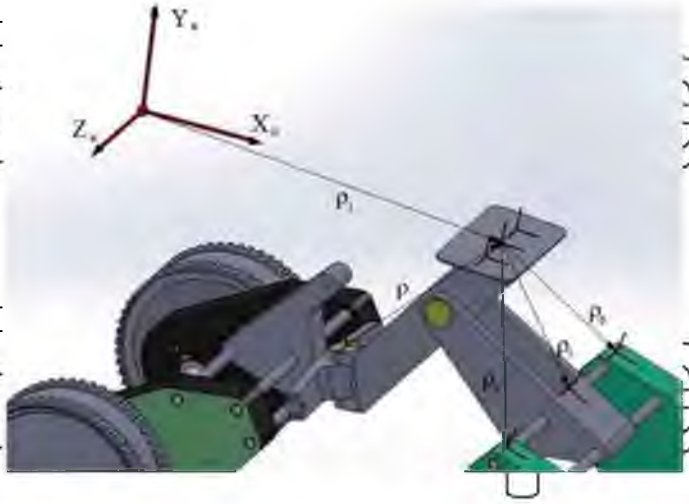

Рисунок 3.1 – Системи координат

На рис. 3.2 докладніше позначені ті самі системи координат.

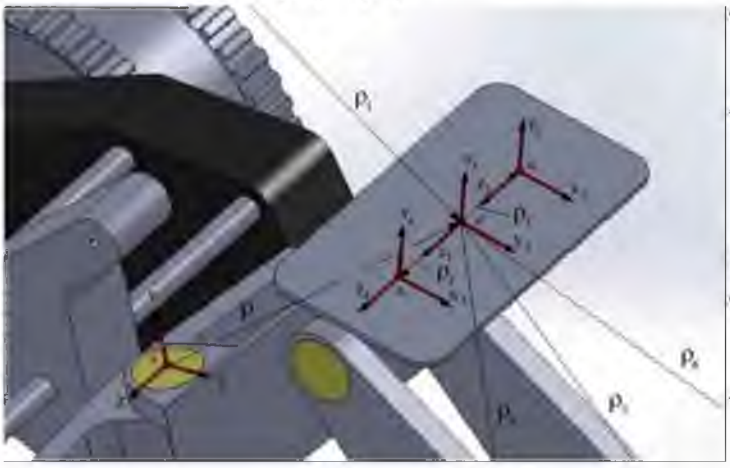

Рисунок 3.2 – Системи координат поворотної платформи

Розглянута схема грунтується на тому, що рівняння поступального та обертального руху транспортного засобу відносяться до системи координат $OX_3Y_3Z_3$. Початок цієї системи знаходиться в точці вимірювання значень акселерометром. Вісь OX_3 спрямована у бік руху транспортного засобу, вісь OY_3 спрямована вгору (перпендикулярно до землі), а вісь OZ_3 доповнює систему координат до правої.

На рис. 3.3 показано систему координат $OXYZ$, яка розташована в центрі мас транспортного засобу, інакше кажучи, є головною центральною системою координат (відцентрові моменти інерції дорівнюють нулю).

На рис. 3.3 також показано допоміжну систему координат $OX_2Y_2Z_2$.

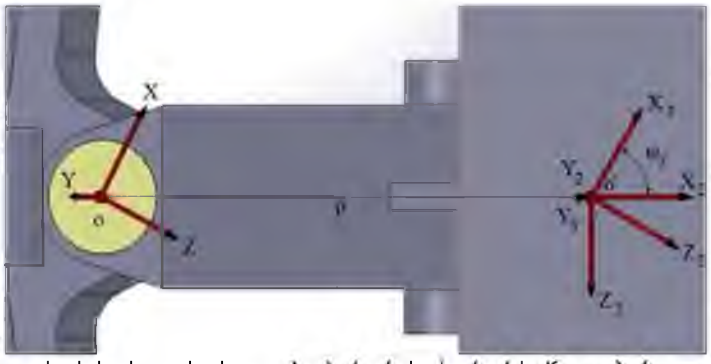

Рисунок 3.3 – Допоміжна система координат

Початки систем координат $OX_3Y_3Z_3$ і $OX_3Y_2Z_2$ збігаються, а також через них проходить вісь обертання поворотної платформи. Взаємне положення систем координат $OX_3Y_3Z_3$ та $OXYZ$ визначається вектором ρ. Кут повороту між системами координат $OX_3Y_3Z_3$ та $OX_3Y_2Z_2$ визначається кутом φ_y.

3.1.1 Динамічна модель

Виведення рівнянь буде виконано на підставі енергетичного методу. Використовується вираз кінетичної енергії транспортного засобу (як твердого тіла):

$$T = \frac{1}{2} m V_0^2 + m V_0 (\omega \times \rho) + \frac{1}{2} \omega^2 I^{(0)}, \qquad (3.1)$$

де m – маса транспортного засобу; $I^{(0)}$ – тензор інерції відносно опорної точки, ρ – радіус-вектор центру мас відносно опорної точки; V_0, ω – відповідно вектори поступальної та обертальної швидкостей транспортного засобу відносно інерційної системи координат.

Індекс 0 означає, що параметри належать до опорної точки.

Використовуючи форму Ейлера-Лагранжа представимо динамічні рівняння у вигляді:

$$\frac{d}{dt} grad_{V_0} T + \omega \times grad_{V_0} T = \sum_j F^{(j)}; \qquad (3.2)$$

НУБіП України

$$\frac{d}{dt}grad_{\omega}T+\omega\times grad_{\omega}T+V_0\times grad_{V_0}T=\sum_j M_0^{(j)}, \qquad (3.3)$$

де $\sum_j F^{(j)}$, $\sum_j M_0^{(j)}$ – відповідно головний вектор та головний момент зовнішніх сил відносно опорної точки.

Проектуючи рівняння (3.2) та (3.3) на осі опорної системи координат, отримуємо

$$m[\dot{V}_0+\omega V_0+(\dot{\omega}+(\omega)^2)\rho]=\sum_j F^{(j)}; \qquad (3.4)$$

$$I^{(0)}\dot{\omega}+\omega I^{(0)}\omega+m\rho(\dot{V}_0+\omega V_0)=\sum_j M_0^{(j)}, \qquad (3.5)$$

де $V_0=[V_{0_X},V_{0_Y},V_{0_Z}]^T$; $\dot{V}_0=[\dot{V}_{0_X},\dot{V}_{0_Y},\dot{V}_{0_Z}]^T$; $F^{(j)}=[F_X^{(j)},F_Y^{(j)},F_Z^{(j)}]^T$;

$M^{(j)}=[M_{0_X}^{(j)},M_{0_Y}^{(j)},M_{0_Z}^{(j)}]^T$; $\omega=[\omega_X,\omega_Y,\omega_Z]^T$; $\dot{\omega}=[\dot{\omega}_X,\dot{\omega}_Y,\dot{\omega}_Z]^T$;

$\rho=[\rho_X,\rho_Y,\rho_Z]^T$;

$$\omega=\begin{bmatrix}0 & -\omega_Z & \omega_Y\\ \omega_Z & 0 & -\omega_X\\ -\omega_Y & \omega_X & 0\end{bmatrix}; \qquad (3.6)$$

$$\dot{\omega}=\begin{bmatrix}0 & -\dot{\omega}_Z & \dot{\omega}_Y\\ \dot{\omega}_Z & 0 & -\dot{\omega}_X\\ -\dot{\omega}_Y & \dot{\omega}_X & 0\end{bmatrix}; \qquad (3.7)$$

$$I^{(0)}=\begin{bmatrix}I_X^{(0)} & -I_{XY}^{(0)} & -I_{XZ}^{(0)}\\ -I_{YX}^{(0)} & I_Y^{(0)} & -I_{YZ}^{(0)}\\ -I_{ZX}^{(0)} & -I_{ZY}^{(0)} & -I_Z^{(0)}\end{bmatrix}; \qquad (3.8)$$

$$\rho=\begin{bmatrix}0 & -\rho_Z & \rho_Y\\ \rho_Z & 0 & -\rho_X\\ -\rho_Y & \rho_X & 0\end{bmatrix}. \qquad (3.9)$$

Індекс «Т» означає операцію транспонування, точка зверху – похідну за часом.

Тензор інерції $I^{(0)}$, що входить у зазначені рівняння, віднесений до опорної системи координат, яка не збігається з головними осями інерції.

Вважатимемо, що відомий тензор інерції $I^{(0)}$ віднесений до системи координат $OXYZ$. Цей тензор має вигляд:

$$I^{(0)} = \begin{bmatrix} I_X^{(0)} & 0 & 0 \\ 0 & I_Y^{(0)} & 0 \\ 0 & 0 & I_Z^{(0)} \end{bmatrix}.$$

Відповідно до теореми Гюйгенса-Штейнера перетворення тензора інерції відносно центру мас 0 в тензор інерції відносно опорної точки 0^* не залежить від вибору координатних осей та виконується за формулою:

$$I^{(0^*)} = I^{(0)} + m(E\rho^2 + \rho\rho). \qquad (3.10)$$

У проекціях на осі опорної системи координат за формулою:

$$I_3^{(0^*)} = I_2^{(0^*)} + m(E\rho^2 - \rho\rho), \qquad (3.11)$$

де $\rho^2 = \rho_X^2 + \rho_Y^2 + \rho_Z^2$ – скалярний квадрат; $I_2^{(0^*)}$ – тензор інерції, віднесений до системи координат $OX_2Y_2Z_2$; $I_3^{(0^*)}$ – тензор, віднесений до вимірювальної системи координат; $\rho\rho$ – діадний добуток.

Припустимо, відома матриця повороту, тоді вираз набуде вигляду:

$$I_3^{(0^*)} = A^E I^{(0)} A + m(E\rho^2 - \rho\rho). \qquad (3.12)$$

Для спрощення моделювання транспортного засобу приймемо, що: транспортний засіб рухається по рівній поверхні; вимірювальна система координат лежить в одній площині з центром мас і ця площина паралельна землі; транспортний засіб рухається поверхнею без прослизання.

Ці припущення дозволять спростити рівняння руху.

Оскільки транспортний засіб буде рухатися по рівній поверхні і без прослизання, випливає, що тіло зможе обертатися тільки навколо осі OZ на кут нишпорення, тоді відповідні елементи матриць і векторів швидкостей і прискорень обнуляються, а матриця повороту A набуде вигляду:

$$A = \begin{bmatrix} \cos\varphi_Y & 0 & \sin\varphi_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi_Y & 0 & \cos\varphi_Y \end{bmatrix},$$

де кут φ_Y – це кут повороту навколо осі OZ, відповідно до рис. 3.3.

Виразивши вектор стовпець $\dot{V}_0 + \omega V_0$ з рівняння (3.4) і підставивши його разом з тензором інерції (3.12) до рівняння (3.5) буде отримано вираз для кутових та лінійних швидкостей та прискорень через значення сум проекцій сил та моментів.

Далі для обчислень було використано математичний пакет Matcad, що дозволяє проводити операції над матрицями символічно.

Перетворені вирази з пакету Matcad у зручному вигляді:

$$\begin{cases} \dot{V}_{0_X^*} + V_{0_Z^*}\omega_Y = \dfrac{1}{m}\sum_j F_X^{(j)} + \rho_X\omega_Y^2 - \dot{\omega}_Y\rho_Z; \\ \dot{V}_{0_Z^*} - V_{0_X^*}\omega_Y = \dfrac{1}{m}\sum_j F_Z^{(j)} + \rho_Z\omega_Y^2 + \dot{\omega}_Y\rho_X; \\ \dot{\omega}_Y = \dfrac{\sum_j M_{0_Y^*}^{(j)} + \rho_X F_Z - \rho_Z F_X}{J_Y}. \end{cases} \quad (3.13)$$

Наведена система рівнянь (3.13) описує рух транспортного засобу, а саме: швидкість та прискорення по осях OX та OZ; кутове прискорення навколо осі OY.

Далі розглядатиметься кінематична модель транспортного засобу, що необхідна для визначення правих частин рівнянь системи 3.13.

А саме, будуть пов'язані математична модель транспортного засобу та математична модель двигуна. Це дозволить отримати повноцінну математичну модель транспортного засобу, вхідними сигналами якої є напруга керування на кожен з двох двигунів, а вихідними координати транспортного засобу по осях OX, OZ і кут повороту відносно осі OX.

З системи рівнянь 3.13 (при $\rho = 0$) можна отримати значення лінійних прискорень по осях OX, OZ та кутове прискорення навколо осі OX. Подвійне інтегрування кожної з виділених величин дасть необхідні значення координат і кута повороту, але потрібні величини сил і моментів.

Для цього розглянемо конструкцію транспортного засобу. З метою спрощення кінематичної моделі було обрано конструкцію триколісного транспортного засобу (2 колеса ведучих, а третє – підтримуюче).

Воно схематично відображено на рис 3.4 (вид зверху).

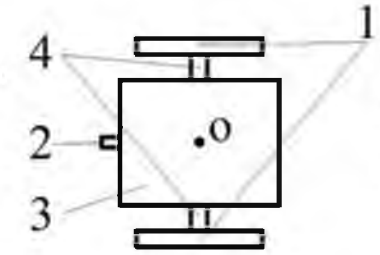

Рисунок 3.4 – Схематичне відображення транспортного засобу

На рисунку: поз. 1 – 2 ведучих колеса; поз. 2 – колесо, що підтримує; поз. 3 – вісок транспортного засобу; поз. 4 – осі обертання ведучих коліс. Точкою O позначено точку центру мас, до якої перераховано сили та моменти з рівняння 3.13.

Розберемо перерахунок сил. Усі необхідні параметри та вектори позначені на рис. 3.5 та 3.6.

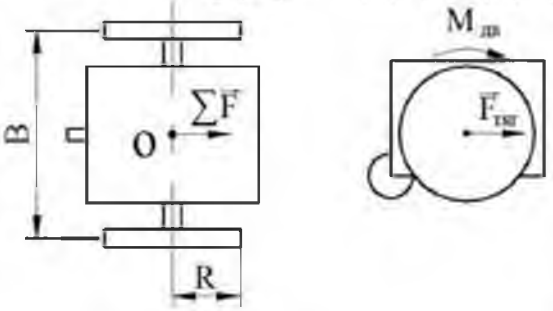

Рисунок 3.5 – Силова модель

На рис. 3.5: R – радіус колеса; B – база (довжина осі), $M_{дв}$ – момент, що розвивається двигуном; $F_{тяг}$ – сила тяги. На рис. 3.6 відображено схему для розрахунку сил.

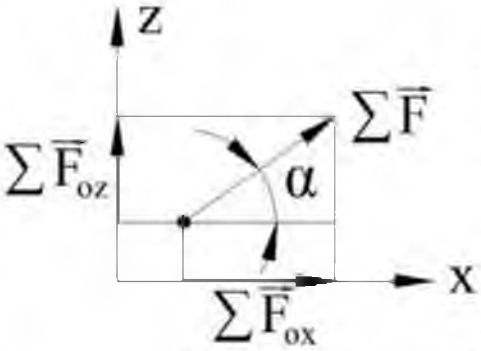

Рисунок 3.6 – Проекція сил на осі

На рис 3.6: α – кут повороту транспортного засобу. Виходячи з передумов вище, було виведено систему рівнянь 3.14.

$$\begin{cases} F_{тяг1} = \dfrac{M_{дв1}}{R}; \\ F_{тяг2} = \dfrac{M_{дв2}}{R}; \\ \sum F = F_{тяг1} + F_{тяг2}; \\ \sum F_{OX} = \sum F \cos\alpha; \\ \sum F_{OY} = \sum F \sin\alpha. \end{cases} \quad (3.14)$$

Сумарний момент навколо осі OY буде пораховано за формулою 3.15.

$$\sum M_{OY} = (F_{тяг1} - F_{тяг2})\rho = \frac{(M_{дв1} - M_{дв2})R}{R}. \quad (3.15)$$

Отримані значення проекцій сил і суми моментів підставляють у праві частини рівнянь (3.13), після чого виходять значення лінійних та кутових прискорень.

3.1.2 Математична модель двигуна

Транспортний засіб має 2 електродвигуни, тому для повноцінного моделювання руху необхідно математично описати і їх.

Найпопулярнішими і найпоширенішими двигунами в робототехніці вважаються двигуни постійного струму. Математична модель двигуна постійного струму добре вивчена та описана у багатьох статтях. Наприклад

в [1], [2], [3] математична модель двигуна дана в сукупності з математичними моделями руху транспортних засобів різної конфігурації за різних умов.

Наведемо диференціальні рівняння, що описують двигун постійного струму:

$$\begin{cases} u_я = e + R_я i + L_я \dfrac{di}{dt}; \\ M = M_c = J \dfrac{d\omega}{dt}; \\ M = C_m \Phi_i; \\ e = C_\omega \Phi_\omega, \end{cases} \tag{3.16}$$

де $u_я$ – напруга на якірній обмотці двигуна; e – електрорушійна сила (ЕРС) якоря; i – струм якоря; Ф – потік, створюваний обмоткою збудження; M – електромагнітний момент двигуна; M_c – момент опору руху; ω – кутова швидкість обертання валу двигуна; R – активний опір якірної обмотки; L – індуктивність якірної обмотки; J – момент інерції якоря; C_ω – коефіцієнт зв'язку між швидкістю та ЕРС; C_m – коефіцієнт зв'язку між струмом якоря та ЕМ моментом.

Розглядається модель двигуна постійного струму із незалежною обмоткою збудження, тому магнітний потік, створюваний обмоткою збудження, вважатимемо постійною величиною.

Відповідно до системи рівнянь (3.16) не важко скласти модель двигуна у вигляді передавальних функцій. У моделі буде 2 вхідні параметри: напруга на якірній обмотці та момент опору. Вихідними параметрами моделі будуть: момент, що розвивається, і кутова швидкість обертання ротора.

Як відомо, двигуни постійного струму можна описати двома характеристиками: механічна (залежність швидкості обертання від моменту) та електромеханічна (залежність швидкості обертання від струму якоря).

Розглянемо обертання двигуна у статичному режимі після перехідних процесів. Тоді із системи рівнянь (3.16) у першому рівнянні подано з індуктивністю обнулиться і набуде вигляду:

$$u_я = e + R_я i. \qquad (3.17)$$

Відповідно до четвертого рівняння системи (3.16) далі розкриємо вираз (3.17) і виразимо кутову швидкість.

$$\omega = \frac{u_я}{C_\omega \Phi} - \frac{R_я}{C_\omega \Phi} i. \qquad (3.18)$$

Аналогічно виразимо кутову швидкість через момент (виразимо струм у 3 рівнянні системи (3.16) і підставимо в 1 рівняння, виражаючи кутову швидкість).

$$\omega = \frac{u_я}{C_\omega \Phi} - \frac{R_я M}{C_\omega \Phi C_m \Phi}. \qquad (3.19)$$

Вирази (3.18) і (3.19) описують електромеханічну та механічну характеристику відповідно

Далі наведемо графіки цих характеристик та порахуємо числові значення (рис 3.7).

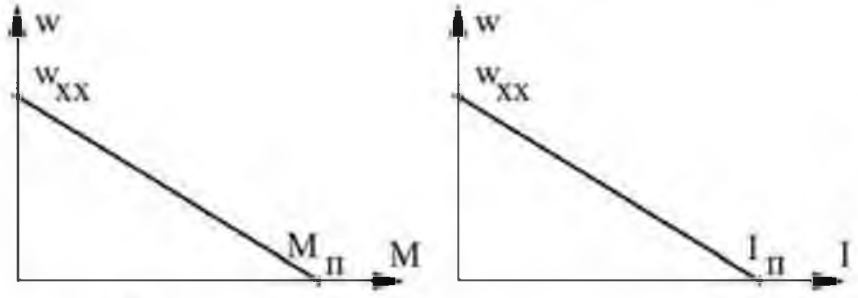

Рисунок 3.7 – Характеристики ДПТ

З виразів (3.18) та (3.19) можна обчислити коефіцієнти $C_\omega \Phi = C_m \Phi = 9$ В/(об/хв).

З електромеханічної характеристики (3.18) при пусковому струмі 8 А можна обчислити необхідний опір якірної обмотки – 3Ом.

НУБіП України

Невідомою залишилася величина $C_m\Phi$. Вона буде знайдена з виразу (3.19) з урахуванням значення пускового моменту за пульсової кутової швидкості – 1Ом Н·м/В

Відомі всі змінні системи (3.16) крім індуктивності котушки, її обчислимо спираючись на необхідний вид перехідного процесу.

Модель у вигляді передавальних функцій відображено на рис. 3.8.

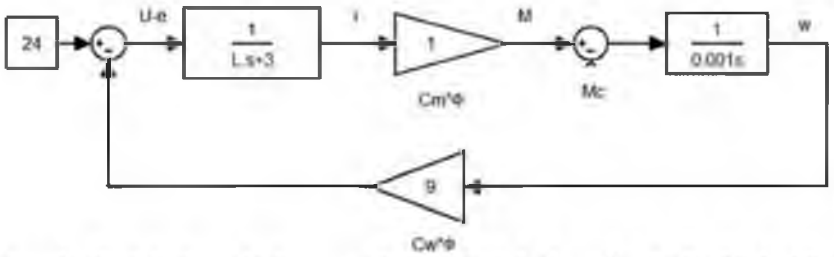

Рисунок 3.8 – Модель двигуна

Для отримання числового значення необхідної індуктивності запишемо передавальну функцію замкнутої системи та проаналізуємо отримані корені. Потім прирівняємо знаменник нулю та обчислимо дискримінант. Якщо дискримінант буде більше нуля, то при відповідному значенні L ланка буде аперіодичною, а якщо менше нуля, то коливальною (комплексно-сполучені корені).

Плавне зростання та зниження швидкості (без перерегулювання) дасть кращі характеристики при керуванні транспортним засобом, тому виконаємо умову $D > 0$.

Тоді, при $L < 0,00025$ Гн швидкість двигуна плавно наростатиме до швидкості обертання холостого ходу без перерегулювання з урахуванням відсутності моменту опору. Переконаємося у цьому, промоделювавши роботу двигуна в середовищі математичного моделювання Matlab.

На вхід моделі подається 2 сигнали, що характеризують напругу, що подається на кожен з двигунів, а на виході формуються координати транспортного засобу по осях OX, OZ і кут повороту відносно осі OX (навколо осі OY).

НУБіП України

Зміна швидкості часу при вхідній напрузі 24В відображена на рис. 3.9.

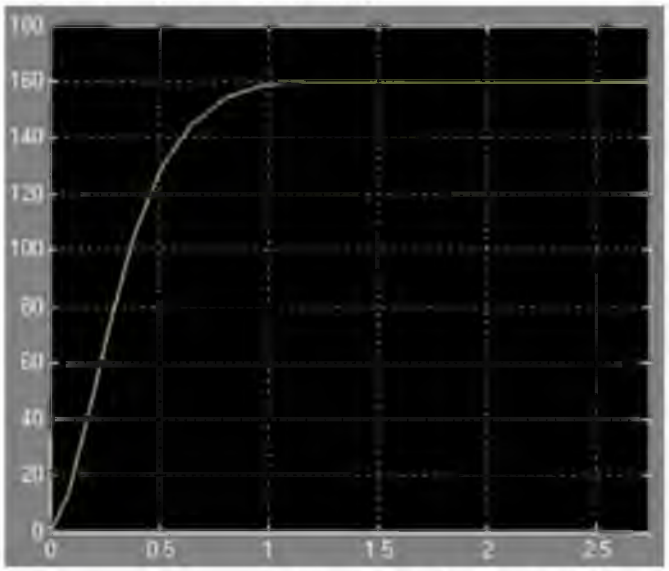

Рисунок 3.9 – Швидкість обертання двигуна

В результаті виконання цієї частини роботи було отримано математичну модель транспортного засобу в цілому.

3.2 Модель системи управління

3.2.1 Структура системи управління

З проведеного вище літературного огляду було виявлено, що при русі в умовах невизначеності добре проявили себе нечіткі регулятори, проте використання одного нечіткого регулятора для керування транспортним засобом є неприпустимим через ускладнення його структури та конфлікт правил з бази правил при керуванні. Тому рекомендується розбити одне завдання досягнення мети та об'їзду перешкод на кілька дрібніших завдань, притому для кожного окремого завдання виділяти свій нечіткий регулятор. Найпоширеніші підзавдання, коли ділять глобальне завдання це: рух до цілі з дотриманням заданої дистанції; рух вздовж правої стінки; рух вздовж лівої стінки. Додатково, з метою зменшення шляху додамо поведінку, яка дозволить виявляти та проїжджати «лазівки» (проїзди у перешкодах). Назвемо цю поведінку «рух у коридорі».

НУБіП України

Описані вище міркування наштовхують на думку про використання поведінкового підходу до управління, як це сказано в [13], [14] та [21]. Це говорить про те, що необхідно спроектувати блок, який вказуватиме на те, яка з поведінок має бути активована в тій чи іншій ситуації. Такий блок назвемо класифікатором поведінки (КП). На вхід КП надходять сигнали з датчиків, а на виході формується сигнал, що характеризує одну з зазначених поведінок.

Так, виявляється загальна структура системи управління. Вона відображена на рис 3.10.

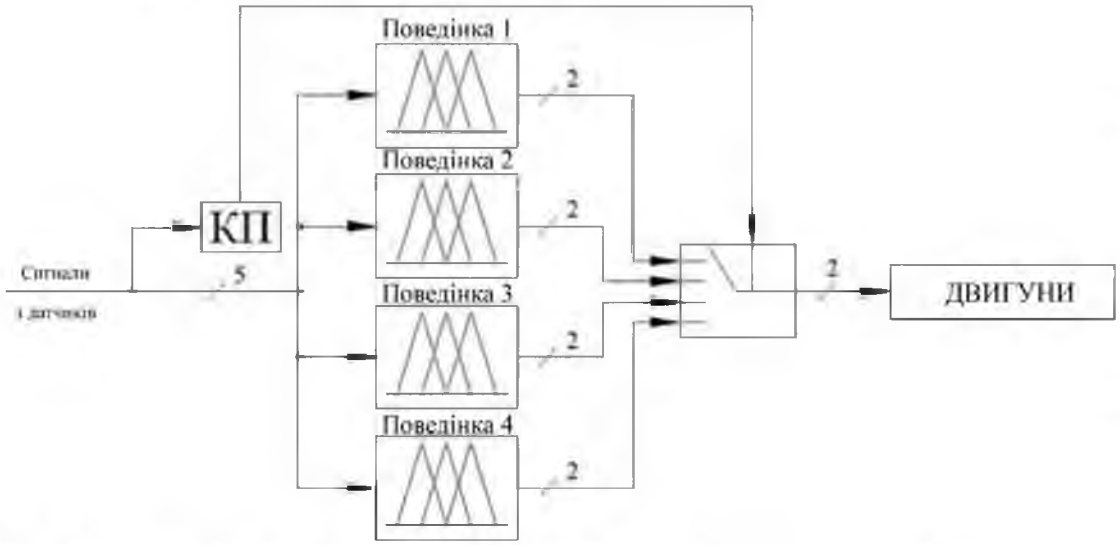

Рисунок 3.10 – Структура системи управління

Сигнали з датчиків попередньо повинні бути перетворені у відстань до перешкоди, так як ультразвукові датчики, що використовуються, формують імпульс, пропорційний відстані до перешкоди.

Швидкість розповсюдження ультразвукової хвилі дорівнює швидкості розповсюдження звуку (340 м/с), тому формула для розрахунку відстані до перешкоди дуже проста.

Діапазон визначення відстані становить 0…4 м, ця інформація йде на вхід КП і на вхід нечітких регуляторів для кожної поведінки. На виході кожного з нечітких регуляторів формується 2 сигнали для керування кожним двигуном.

Під час роботи всієї системи КП виявляє поведінку, яка має бути активована, відповідно до поточної обстановки перед транспортним засобом та видає сигнал, що характеризує цю поведінку. Далі після обчислення керуючих впливів нечітким регулятором з відповідної поведінки вихідний сигнал пропускається на вихід системи та на вхід двигунів, так і здійснюється керування. Через роботу алгоритму повинна формуватися плавна траєкторія руху транспортного засобу до цілі з об'їздом чи подоланням перешкод.

Далі будуть розроблятися всі вищеперелічені моделі поведінки, починаючи з найпростіших.

3.2.2 Формування апаратних вимог

«Очима» транспортного засобу є камера. Однак камера використовується в даній роботі для відстеження цілі, тому було встановлено ультразвукові датчики для визначення перешкоди на шляху.

Передбачається використання ультразвукових датчиків HC-SR04. Такі датчики переважно використовуються в робототехніці.

Сам датчик зображено на рис. 3.11.

Рисунок 3.11 – Ультразвуковий датчик

Основні характеристики, необхідні для моделювання: діапазон відстаней: 2…400 см; робочий кут спостереження: 30°.

Ставиться завдання емуляції даного датчика у середовищі Matlab у тому, щоб система управління моделлю транспортного засобу мала можливість відстежувати оточення і реагувати на нього у віртуальному полі Matlab.

НУБіП України

Логіка роботи датчика в середовищі Matlab: на виході датчика повинен формуватись сигнал відстані до перешкоди; якщо перешкоди на робочому куті спостереження немає, то на виході датчика повинен формуватися сигнал 4 м (максимальний діапазон). якщо на робочому куті спостереження перебуває перешкода на відстані ближче ніж 4 м, на виході датчика повинен формуватися сигнал, що характеризує відстань до перешкоди.

Ефективність функціонування алгоритмів залежить від того, наскільки точно буде визначатися зовнішнє середовище. Інакше висловлюючись, траєкторія руху транспортного засобу буде гладше і коротше, якщо точніше визначено оточення робота. Виходячи з цього, визначатимемо необхідну кількість датчиків для найбільш прийнятної траєкторії руху.

Найчастіше при моделюванні руху роботів у невизначеному середовищі, траєкторія їхнього руху збільшується через необхідність об’їзду перешкод. Мало хто шукає у цих перешкодах лазівки, які можна подолати, адже вони (лазівки) зменшили б траєкторію руху, звільняючи транспортний засіб від об’їзду перешкоди.

Вибиратимемо кількість датчиків виходячи з цього параметра. Пошук лазівок у перешкодах передбачає більш точне сканування місцевості. У зв’язку з цим було вирішено розташовувати датчики так, щоб робоча область одного перекривалася інший.

Ілюстрація сказаного відображена на рис. 3.12

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

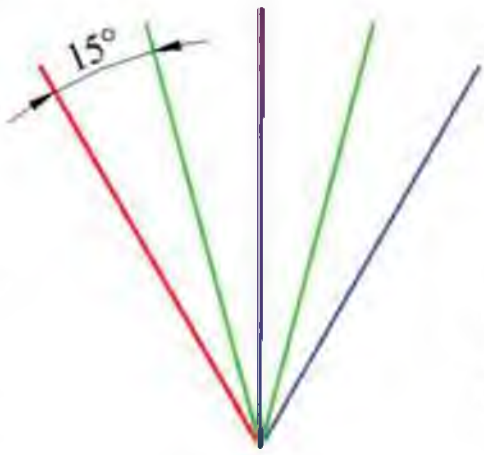

Рисунок 3.12 – Розташування датчиків

На рис. 3.12 відображено 3 датчики, робочі області яких перекривають один одного, тим самим з'являється 4 області з оглядом 15°, замість 3 областей по 30°. Ідея такого розташування датчиків була заснована на принципі роботи фасеткового зору комах. Кожна з областей 15° інтерпретується як структурний елемент омматидій у системі зору комахи.

Виконуючи пошук лазівок у перешкоді, необхідно знайти прохід шириною, яка більше, або дорівнює ширині транспортного засобу.

Для цього побудуємо залежність впевненого визначення ширини лазівки від відстані до перешкоди та кількості датчиків.

Ця залежність будуватиметься на підставі рис. 3.13.

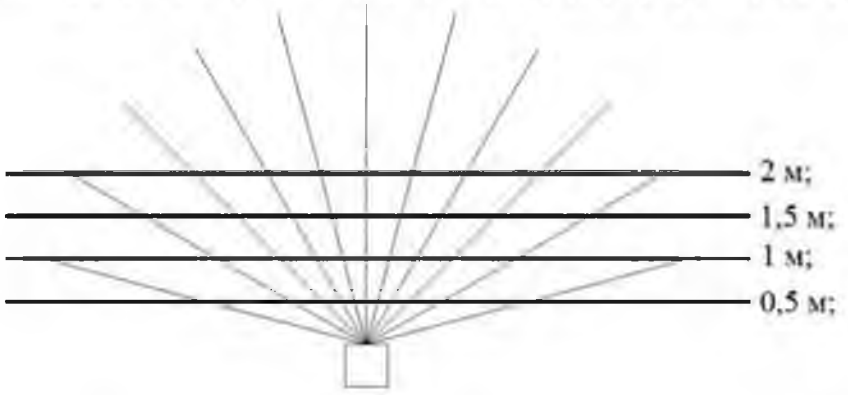

Рисунок 3.13 – Визначення ширини лазівки

На рис. 3.13 відображено 9 датчиків, на підставі яких будемо судити про можливість визначення лазівки. Для впевненого визначення лазівки

вона повинна займати не менше 2 областей по 15°. Товсті лінії емітують перешкоду, а числа праворуч – відстань цих перешкод до транспортного засобу. Для відображення на графіку датчики були пронумеровані зліва направо. Сам графік відображено на рис. 3.14.

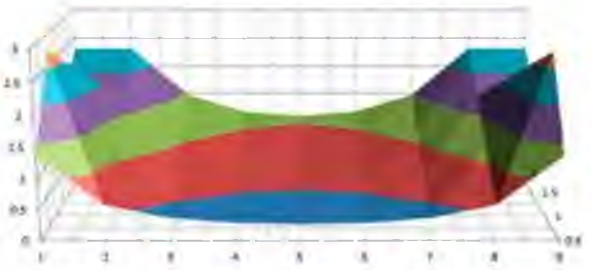

Рисунок 3.14 – Ширина лазівки

Виходячи з отриманих даних, лазівка шириною більше 400 мм впевнено починає визначатися з відстані 1 м датчиками 4, 5 і 6. Крім цього подивимося на форму отриманої поверхні. У крайніх областях огляду в районі датчиків 1, 2 і 8, 9 спостерігається втрата точності через те, що перешкода знаходиться під кутом до датчиків, а в зонах 3, 4, 5, 6 і 7 датчиків поверхня найбільш плавна, що говорить про більш точне визначення лазівок.

Виходячи з цих міркувань, було вирішено використовувати 4 ультразвукові датчики, які дадуть 5 областей по 15° та загальний кут огляду 75°. Будь-який датчик насправді має час опитування, тому інформацію про навколишнє середовище буде отримано не відразу, а через деякий час.

Основним критерієм руху є безпека (уникнення зіткнення). Оцінимо час, який необхідний для повної зупинки транспортного засобу та гальмівний шлях під час руху з максимальною швидкістю. Цей розрахунок покаже, чи встигне загальмувати транспортний засіб за даної кількості датчиків.

Швидкість, що максимально розвивається транспортним засобом, становить 4 м/с переведемо в км/год і округлим (4 м/с ~ 15 км/год). При

гальмуванні необхідно враховувати умову керованості, тобто необхідно гальмувати з силою трохи більше сили тертя ковзання.

Обчислимо значення сил: $F_{тр.коч.} = 29,841$ Н, $F_{тр.ков.} = 13,72$ Н.

Сила тертя ковзання показує, який опір буде надано транспортному засобу з гумовими колесами при ковзанні по бетонній поверхні (некерований варіант).

Сила тертя кочення показує, який постійний опір руху здійснюється.

Різниця цих сил покаже максимальну силу, з якою можна гальмувати, зберігаючи керованість – 16,121 Н.

Для наочного подання процесу здійснимо гальмування з різною інтенсивністю (0%, 25%, 50%, 75% від допустимого).

При русі без гальмування (втрата швидкості відбувається через силу тертя кочення) $t = 1,276$ с.

Гальмівний шлях – 2,657 м.

Спираючись на логіку функціонування, що описана вище, в середовищі Matlab був спроектований блок емуляції датчиків. Блок відображено на рис. 3.15.

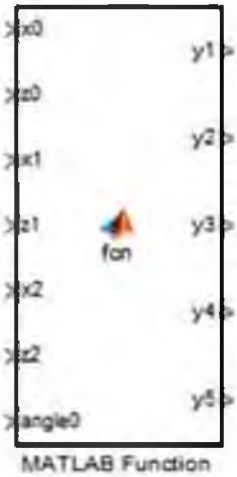

Рисунок 3.15 – Блок емуляції датчиків

Блок розширюється, тому кількість перешкод, що задаються, не обмежена, але впирається в продуктивність моделюючого комп'ютера.

НУБіП України

3.2.3 Модель поведінки «рух до цілі»

Далі при викладі матеріалу під поведінкою розуміється проектована модель поведінки та опис цієї поведінки за допомогою нечітких регуляторів.

Транспортний засіб рухатиметься у просторі 15х15 м. Така вимога розмірів області руху була сформована виходячи з можливості перевірки роботи алгоритму нечіткого виведення кожному з моделей поведінки.

Поведінка «рух до цілі» має забезпечувати рух транспортного засобу до цілі з урахуванням відсутності перешкод перед транспортним засобом. Це полегшує структуру даного регулятора, оскільки не потрібні сигнали з ультразвукових датчиків.

Основними параметрами, необхідними для руху до цілі є: відстань до цілі (дозволить регулювати швидкість руху залежно від відстані); неузгодження необхідного курсу та поточного курсу транспортного засобу (дозволить націлювати транспортний засіб на ціль); швидкість зміни поточного курсу або кутова швидкість (необхідна для плавного управління інерційним тілом).

При фізичній реалізації цієї поведінки координати транспортного засобу будуть визначатися із системи глобального позиціонування, а координати цілі перераховуватимуться ПЛП.

Модель транспортного засобу, побудована в середовищі Matlab Simulink, на виході має параметри координат положення транспортного засобу, а також кут, на який повернуто транспортний засіб відносно осі OX. Цей кут має діапазон [-359; 359].

На рис 3.16 показаний принцип формування кута повороту моделі.

НУБіП України

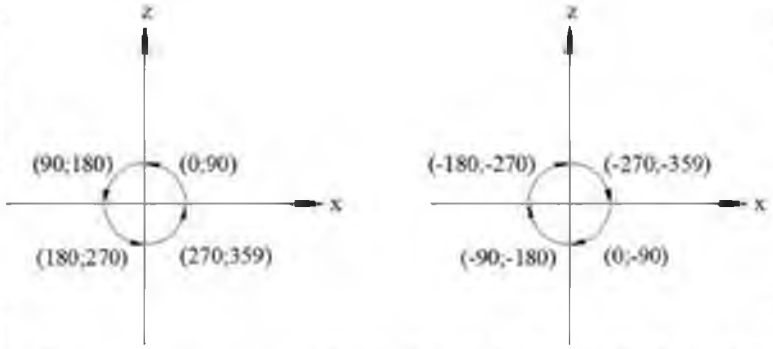

Рисунок 3.16 – Кут повороту

Лівий рисунок відображає курс транспортного засобу, якщо він повертатиметься проти годинникової стрілки, а правий – за годинниковою стрілкою. Такий діапазон не придатний для керування у вибраному середовиші через великі параметри кутів, тому було сформовано блок, який зменшує діапазон кутів повороту до [-180;180]. На рис. 3.17 відображено новий принцип формування кута повороту.

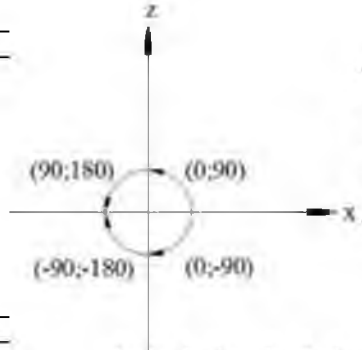

Рисунок 3.17 – Кути повороту з меншим діапазоном

Оскільки відоме положення транспортного засобу та положення цілі, то можна обчислити і відстань до неї.

Для формування сигналу неузгодженості необхідного та поточного курсу, необхідно знати кутове положення цілі відносно транспортного засобу. Для цього достатньо знати координати транспортного засобу та цілі. Принцип формування кутового положення цілі відносно транспортного засобу відображено на рис. 3.18.

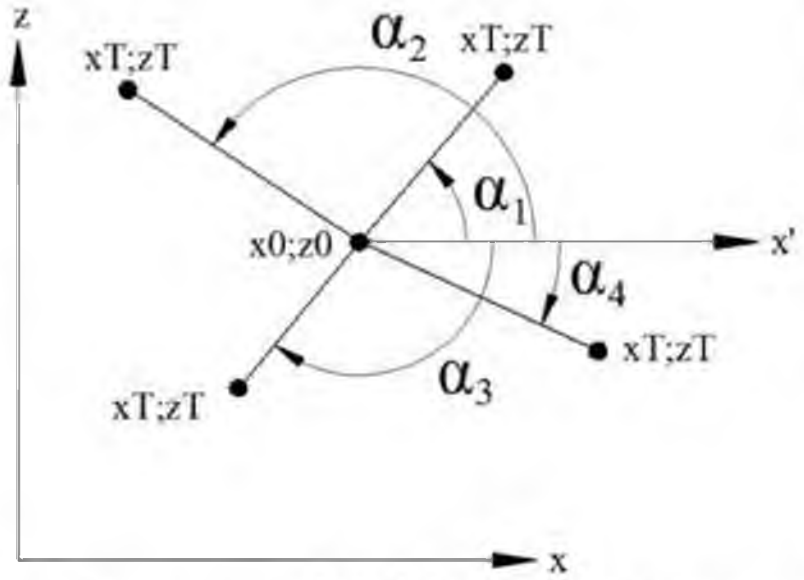

Рисунок 3.18 – Необхідний курс

На рис. 3.18 вісь X' пов'язана з системою координат транспортного засобу, так само зазначено 4 різні варіанти положення цілі. Індекс при куті α визначає квадрант, у якому перебуває ціль відносно транспортного засобу. Від цього залежить формула розрахунку кута. Діапазон кутів, у яких визначається ціль [-180;180]. Завдяки суміщенню діапазонів необхідного та поточного курсів з'являється можливість отримати сигнал неузгодженості кутів для можливості підрулювання транспортного засобу під час руху до цілі.

Величина швидкості зміни поточного курсу буде отримана за допомогою derivative в середовищі Matlab (знаходження першої похідної за часом кута повороту). Таким чином сформувалося 3 величини для руху до цілі: відстань до цілі; величина неузгодженості кутів; швидкість зміни курсу. Для цих дій був використаний програмний блок Matlab function.

Поведінка «рух до цілі» виходить з нечіткому регуляторі. Для цього використовуватиметься спеціалізований пакет Matlab Fuzzy Logic Toolbox.

Принципи роботи нечітких регуляторів добре описані джерелах [6], [8], [11], тому зупинятися на описі немає необхідності.

НУБіП України

Усі регулятори, що розробляються далі, використовують нечіткий алгоритм Mamdani, а при дефазифікації використовується метод центру тяжіння.

На вхід нечіткого регулятора подається 3 сигнали, а на виході 2 (напруга на кожен двигун). На рис. 3.19, показаному нижче, у центрі зображено іконку, що символізує базу правил, на базі якої проводитиметься управління (робота моделі поведінки «рух до цілі»).

Діалогове вікно програмного продукту з розробленим нечітким регулятором відображено на рис. 3.19.

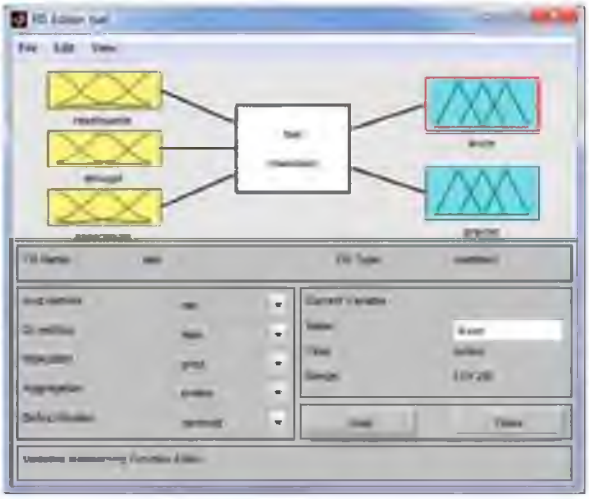

Рисунок 3.19 – Поведінка «рух до цілі»

Значення відстані має діапазон від 0 до 10 м. Ця змінна характеризує відстань до цілі і називається rasstoianie. Для цієї змінної було введено 3 лінгвістичних змінних: «blizko», «sredne», «daleko».

Функції приналежності, що описують дані лінгвістичні змінні, відображені на рис. 3.20.

НУБіП України

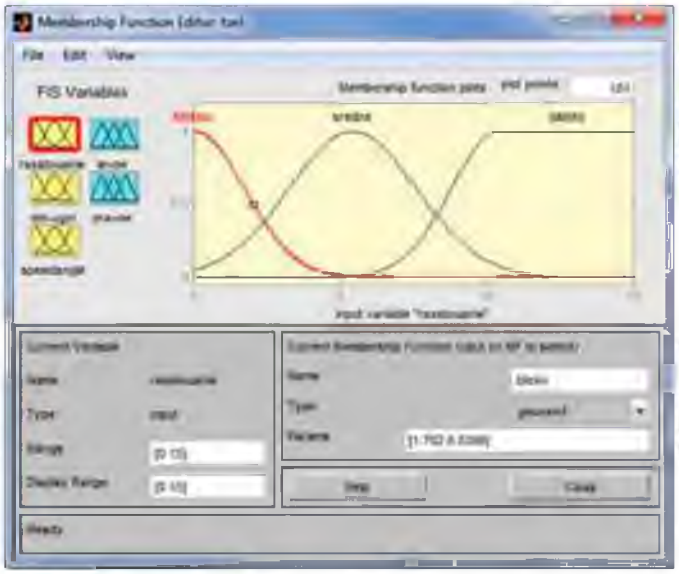

Рисунок 3.20 – Змінна відстані

Вище описані вхідні змінні, тепер слід описати вихідні.

Було введено 2 вихідні змінні: levoe, pravoe. Вони характеризують напругу, що подається на ліве та праве колесо для керування. Діапазон зміни змінної [-24; 24] В. Ці дві змінні ідентичні, тому опишемо лише одну з них.

Для кожної із змінних були введені лінгвістичні змінні «neg», «zero» та «poz». Функції приналежності представлені на рис. 3.21.

Рисунок 3.21 – Змінна напруги, що подається

Далі визначимо базу правил, виходячи з якої має функціонувати нечіткий регулятор. При даній кількості вхідних змінних та описуючих лінгвістичних змінних загальна кількість правил становить 27. Вікно формування правил відображено на рис. 3.22.

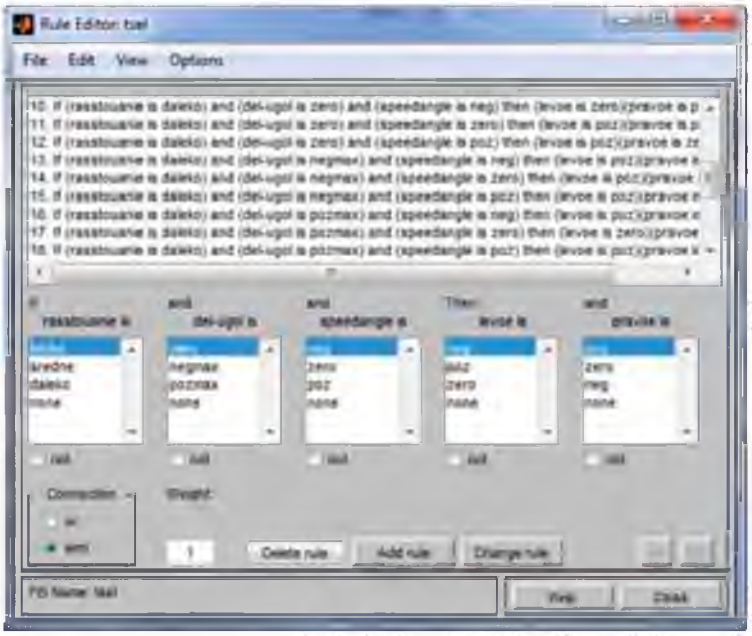

Рисунок 3.22 – Завдання правил

При наближенні транспортного засобу до цілі на задану відстань розпочнеться зупинка. Це було зроблено для того, щоб не сталося зіткнення з ціллю. Дистанція, на якій слід зупинитися на транспортному засобі, визначається положенням функції приналежності для лінгвістичної змінної «blizko». Для збільшення дистанції між ціллю та транспортним засобом функцію приналежності слід перемістити праворуч.

Для перевірки працездатності цієї поведінки було проведено 4 моделювання та задані координати цілей (4;6), (7;8), (5;-6), (0;-5).

Результати моделювання представлені на рис. 3.23.

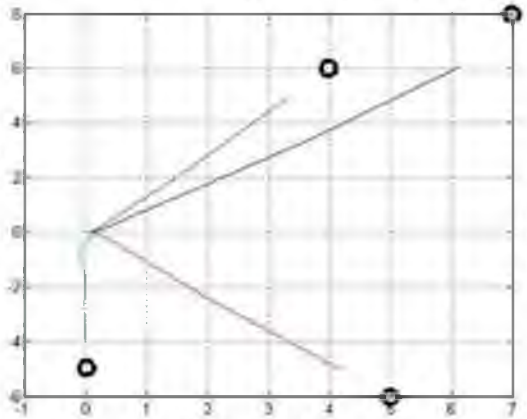

Рисунок 3.23 – Рух до мети

На рисунку копами позначені цілі, до яких прагне транспортний засіб.

Результати моделювання підтверджують працездатність поведінки «рух до цілі».

3.2.4 Модель поведінки «рух вздовж стінок»

Ця поведінка була сформована для того, щоб транспортний засіб міг рухатися вздовж правої або лівої стінки, об'їжджаючи перешкоду з відповідної сторони. Поведінка «рух вздовж стінок» включає поведінку «рух вздовж правої стінки» і поведінка «рух вздовж лівої стінки», але оскільки вони ідентичні за принципом функціонування, одну з поведінок опишемо повністю, а до іншої буде надана база правил і результати моделювання для перевірки працездатності.

У розділі 3.2.2 було сказано, що на борту транспортного засобу буде 4 датчики, які дадуть 5 секторів огляду по 15°. Пронумеруємо сектори зліва направо від 1 до 5. На виході блоку емуляції датчиків та рис. 3.15 є 5 виходів з кожного із заданих секторів.

Для формування поведінки «рух вздовж правої стінки» необхідно 3 сигнали: сигнал із 5 сектора (для контролю стінки праворуч); сигнал із 3 сектора (для запобігання зіткненню спереду); кутова швидкість повороту транспортного засобу (для врахування інерційності).

При збільшенні кількості вхідних сигналів нечіткого регулятора, кількість правил у базі зросте у рази, тому необхідно використовувати лише необхідні сигнали.

Для того, щоб рухатися вздовж правої стінки, достатньо контролювати стінку праворуч і можливу стінку спереду, щоб не зіткнутися з перешкодою, яка перебуває на шляху транспортного засобу.

Ілюстрація вищесказаного представлена на рис. 3.24.

НУБіП України

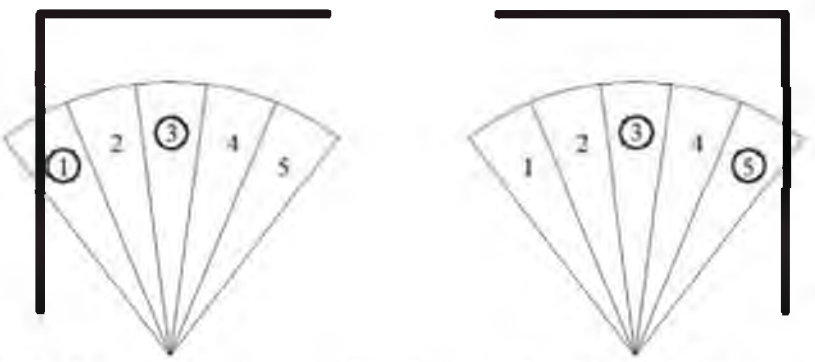

Рисунок 3.24 – Обґрунтування кількості датчиків

На рисунку представлені варіанти для руху вздовж правої стінки (праворуч) та руху вздовж лівої стінки (ліворуч). Якщо під час руху вздовж правої стінки перешкод не виявляється (сигнал з 3 сектора 4 м.), то транспортний засіб продовжуватиме рух вздовж правої стінки.

Для поведінки «рух уздовж правої стінки» у програмному середовищі Matlab Fuzzy logic Toolbox був спроектований нечіткий регулятор на вхід якого подається 3 сигнали, а на виході формується 2.

Вхідними сигналами є 2 сигнали з 3 і 5 секторів і сигнал про кутову швидкість повороту, а вихідними є величини напруг, що подаються на праве та ліве колесо транспортного засобу.

У 3.2.3 вже були описані функції приналежності для вихідних сигналів і сигналу кутової швидкості, тому їх описувати не будемо. Опишемо сигнали з ультразвукових датчиків.

Область, в якій визначено функції приналежності для кожного датчика [0,4] м (технічна характеристика 3.2.1).

Почнемо із центрального сектору №3. Для його позначення було введено змінну «y3», а для її визначення було введено лінгвістичні змінні «mid» і «max».

На рис. 3.25 представлені функції приналежності цих змінних.

НУБіП України

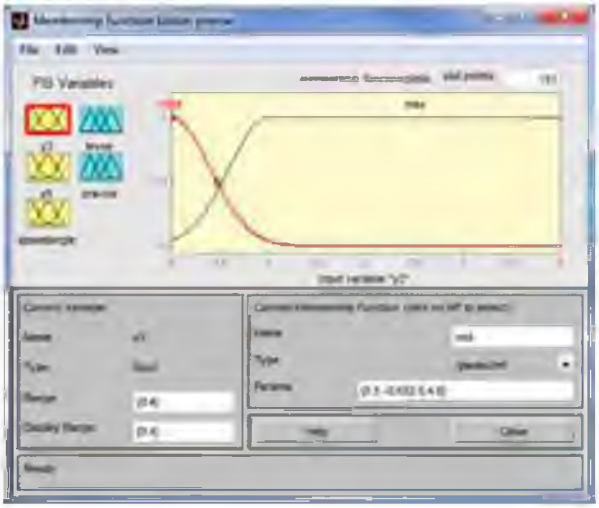

Рисунок 3.25 – Функції для «y3»

Змінна, що визначає стінку праворуч, позначена як «y5» (сектор №5). Лінгвістичні змінні для неї названі «min», «mid» та «max».

Їх функції приналежності представлені на рис. 3.26.

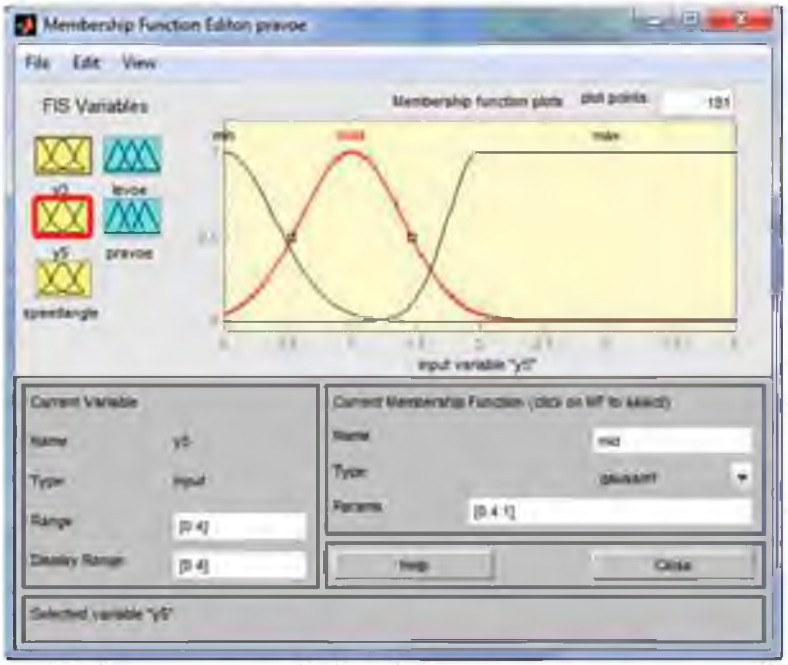

Рисунок 3.26 – Функції приналежності для «y5»

Для поведінки «рух вздовж лівої стінки» змінна «y1» описується аналогічно до змінної «y5».

Після опису всіх змінних перейдемо до формування бази правил. Відповідно до заданих функцій приналежності можна сформувати 18 правил.

Для тестування працездатності кожної з поведінок на полі руху транспортного засобу було встановлено Г-подібну перешкоду та проведено моделювання кожної з поведінок.

Результати моделювання (траєкторії об'їзду) представлені на рисунках 3.27 та 3.28 для руху вздовж правої та лівої стінки відповідно.

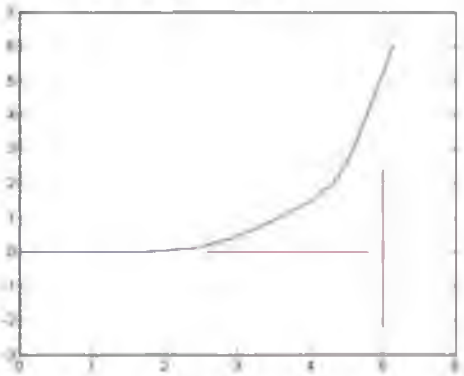

Рисунок 3.27 – Поведінка «рух уздовж правої стінки»

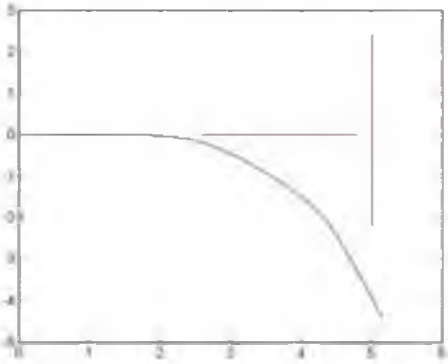

Рисунок 3.28 – Поведінка «рух вздовж лівої стінки»

Результати моделювання підтверджують працездатність поведінок «рух уздовж правої стінки» та «рух уздовж лівої стінки».

3.2.5 Модель поведінки «рух у коридорі»

Ця поведінка була названа так через те, що транспортний засіб під її керуванням буде рухатися серед (через) перешкоди. У 3.2.2 підбиралася кількість датчиків для реалізації цієї поведінки. Описи такої поведінки у вітчизняній та закордонній літературі знайдено не було, що ускладнює її розробку.

НУБіП України

Як говорилося в 3.2.2, ця поведінка дозволяє знайти «лазівки» під час руху до цілі. Найочевидніший варіант перешкоди для цієї поведінки це стіна з проїздом (лазівкою). За раніше зробленими розрахунками «лазівка», в яку може вміститися транспортний засіб, впевнено розпізнається на відстані близько 1 м, тому якщо «лазівка» була розпізнана раніше (на відстані більше 1 м від стінки), то вона буде більшою, ніж ширина транспортного засобу.

На вхід поведінки «рух у коридорі» повинні подаватися сигнали з усіх датчиків, так як «лазівка» може знаходитися в будь-якому місці стіни в зоні видимості, так само повинен подаватися сигнал про кутову швидкість повороту (як і у разі інших поведінок), а на виході також формуються управляючі сигнали для двигунів.

Було сформовано 5 однотипних змінних для отримання сигналів кожного сектора. Змінні іменовані як: «y1», «y2», «y3», «y4», «y5». Діапазон, у якому визначено функції приналежності для лінгвістичних змінних, становить 0.4 м (за зоною дії датчиків).

Для кожної з вхідних змінних визначено лінгвістичні змінні «blizko», «sredne» та «daleko».

Їх функції приналежності представлені на рис. 3.29.

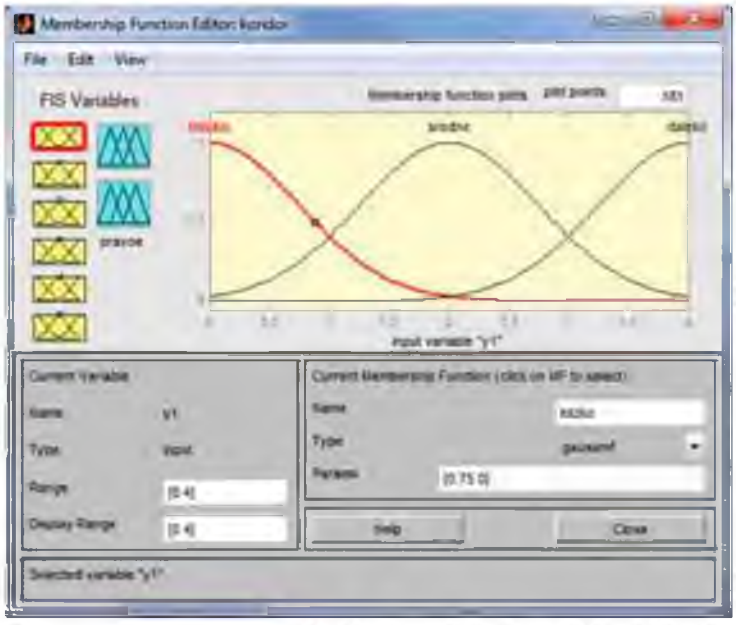

Рисунок 3.29 – Функції приналежності для змінних

Як і було сказано раніше, змінні ідентичні, тому наведемо функції приналежності лише однієї з них.

Сигнал, що характеризує кутову швидкість повороту транспортного засобу, названий «speedangle» та визначений аналогічно з попередніми поведінками.

На відміну від інших поведінок, «рух у коридорі» є більш точним, тому для нього було визначено більше лінгвістичних змінних для сигналу на виході та визначено більше правил, за якими функціонує нечіткий регулятор, що розробляється.

Вихідні змінні називаються так само, а лінгвістичні змінні названі таким чином: «neg», «negmid», «zero», «pozmid2, «poz». Область визначення змінної [-24.24], відповідає максимальній управляючій напрузі двигунів постійного струму.

Функції приналежності їм представлені на рис. 3.30.

Рисунок 3.30 – Функції приналежності для levoe

Перейдемо до бази правил. З урахуванням кількості функцій приналежності кожної вхідної змінної можна вважати загальну кількість можливих правил на базі: 36…729.

Введення такої великої кількості правил дуже трудомістке і може призвести до конфлікту правил, як зазначалося в 3.2.1. Необхідно виділити ключові ситуації, у яких поведінка виконає свій функціонал, а перебір всіх можливих варіантів сигналів виконуватиметься класифікатором поведінки.

Ключові ситуації, що вимагають розгляду, відображені на рис. 3.31.

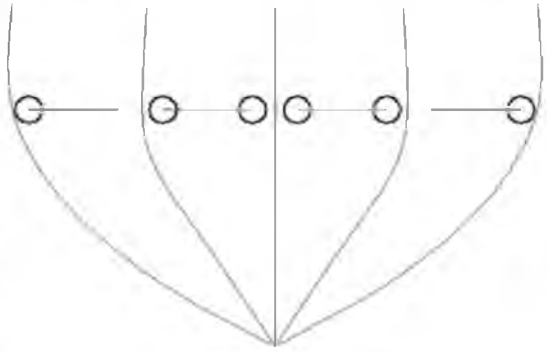

Рисунок 3.31 – Поведінка «рух у коридорі»

На рисунку позначено перешкоду з «лазівками». Кола на краях «лазівок» вказують на небезпеку зіткнення, а кривими лініями показані необхідні варіанти траєкторій об'їзду такого типу «лазівки».

Для цієї поведінки розглянуто 5 варіантів подолання перешкод. Два крайні варіанти показують подолання перешкоди об'їздом (для кожної траєкторії по одній небезпечній точці). Двома середніми траєкторіями є проїзд у бічні «лазівки» (так само по одній небезпеці). Траєкторією посередині є проїзд в «лазівку» спереду (небезпека зіткнення з обох боків).

Лазівки, визначені датчиками в центрі стінки, мають менший розмір по відношенню до тих, що розташовані по краях. Це відбувається через спотворення при скануванні (цей процес описаний у 3.2.2). Тому «лазівки» попереду потрібно контролювати краще, ніж лазівки з обох боків. Лазівки по краях матимуть більший розмір, тому достатньо контролювати тільки той кут, поряд з яким здійснюватиметься проїзд відносно центру (на рисунку виділено коло).

З цих міркувань було визначено базу правил. Через більшу кількість датчиків і високих вимог до точності управління в базі вийшло 48 правил.

Для перевірки працездатності алгоритму було використано перешкоду, схожу формою з тією, що зображено на рис. 3.31. Даний вид перешкоди добре описує «лазівку», яку необхідно знайти у перешкоді чи стіні. Однак розміри «лазівки» не слід збільшувати занадто сильно через те,

що вона може бути ідентифікована підсистемою визначення перешкод, що покаже гірші результати при тестуванні на реальних об'єктах.

Моделювання поведінки «рух у коридорі» показало траєкторії, що відображені на рис. 3.32, 3.33 та 3.34.

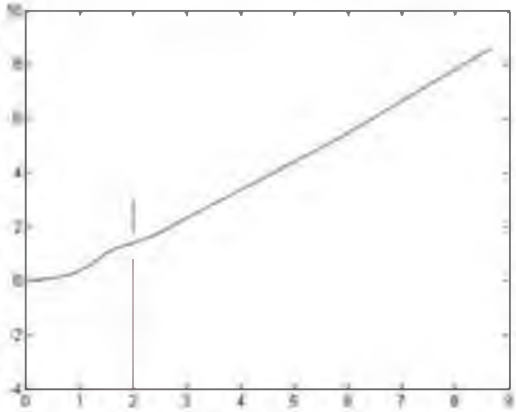

Рисунок 3.32 – «Лазівка» зліва

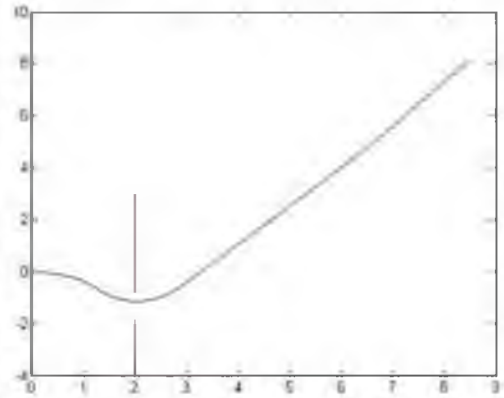

Рисунок 3.33 – «Лазівка» зправа

Результати моделювання підтверджують працездатність поведінки рух у коридорі.

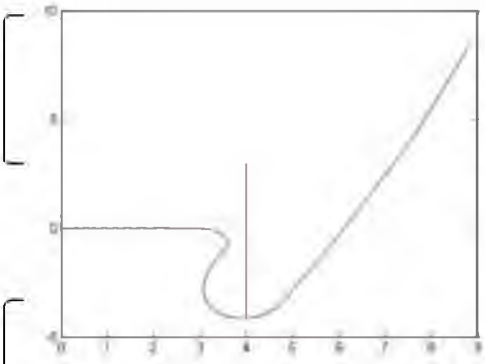

Рисунок 3.34 – Об'їзд перешкоди

ВИСНОВКИ

В результаті виконання роботи було здійснено такі завдання:

- виконано математичне моделювання транспортного засобу (виведення рівнянь руху, кінематична модель);
- розроблено моделі системи управління (4 моделі поведінки на нечіткому регуляторі, класифікатор поведінок на нейромережевому підході та програмному підході);
- виконано моделювання руху транспортного засобу із зазначенням переваг та недоліків кожного підходу в умовах розглянутої задачі.

Новизна виконаної роботи полягає в тому, що в емульовану модель транспортного засобу була включена динамічна складова. Також була спроектована модель поведінки «рух у коридорі», раніше не введена розробниками автоматичних систем управління.

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kaur, N.P. Comparison Study of Mamdani Method and Sugeno Method in The Navigation System for Indoor Mobile Robot / N.P. Kaur, V.Verma // International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET). - 2015. -V.4, №3, - P. 166-169.

2. Pandey, A. MATLAB Simulation for Mobile Robot Navigation with Hurdles in Cluttered Environment Using Minimum Rule Based Fuzzy Logic Controller / A. Pandey, D.R. Parhi // 2nd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering, ICIAME 2014.-2014. -V.14. - P. 28-34.

3. Mitrovic, S.T. Fuzzy-Based Controller for Differential Drive Mobile Robot Obstacle Avoidance / S.T. Mitrovic, Z.M. Djurovic // 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicle. - 2010. -V.7. - P. 67-72.

4. Tsmots, I. A fuzzy logic based navigation system for a mobile robot in uncertain environment / I. Tsmots, V. Teslyuk, A. Romanyuk, I. Vavruk // Енергетика: економіка, технології, екологія. -2015. -№4. -P. 7-10.

5. Abadi, D.N.M. Design of optimal Mamdani-type fuzzy controller for nonholonomic wheeled mobile robots / D.N.M. Abadi, M.H. Khooban // Journal of King Saud University - Engineering Sciences. - 2015. -V.27, №1. -P. 92100.

6. Hossen, J. A Modified Hybrid Fuzzy Controller for Real-Time Mobile Robot Navigation / J. Hossen, S. Sayeed, A.K.M. Parvez Iqbal // Procedia Computer Science. - 2015. - V.76. - P. 449-454.

7. Bajrami, X. Artificial Neural Fuzzy Logic Algorithm for Robot Path Finding / X. Bajrami, A. Dermaku, N. Demaku // IFAC-PapersOnLine. - 2015. - V.48, №24. -P. 123-127.

8. Algabri, M. Comparative study of soft computing techniques for mobile robot navigation in an unknown environment / M. Algabri, H. Mathkour, H. Ramdane, M. Alsulaiman // Computers in Human Behavior. - 2015. - V.50. - P. 42-56.

НУБіП України

9. Bakdi, A. Optimal path planning and execution for mobile robots using genetic algorithm and adaptive fuzzy-logic control / A. Bakdi, A. Hentout, H. Boutami, A. Maoudj etc. // Robotics and Autonomous Systems. - 2017. - V.89. - P. 95109.

10. D. Serpanos, The cyber–physical systems revolution, Computer 51 (3) (2018) 70–73.

11. Z. You, L. Feng, Integration of industry 4.0 related technologies in construction industry: A framework of cyber–physical system, IEEE Access 8 (2020) 122908–122922.

12. C. Chen, C. Wang, T. Qiu, M. Atiquzzaman, D.O. Wu, Caching in vehicular named-data networking: Architecture, schemes and future directions, IEEE Commun. Surv. Tutor. 22 (4) (2020) 2378–2407.

13. A. Barakabitze, A. Ahmad, R. Mijumbi, A. Hines, 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges, Comput. Netw. 167 (2020) 1–40.

14. X. You, C. Wang, et al., Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts, Sci. China Inf. Sci. 64 (1) (2021) 110301.

15. H. Cao, H. Hu, Z. Qu, L. Yang, Heuristic solution of virtual network embedding: A survey, China Commun. 15 (3) (2018) 186–219.

16. X. Li, C. Guo, L. Gupta, R. Jain, Efficient and secure 5G core network slice provisioning based on VIKOR approach, IEEE Access 7 (2019) 150517–150529.

17. H. Cao, L. Yang, H. Zhu, Novel node-ranking approach and multiple topology attributes-based embedding algorithm for single-domain virtual network embedding, IEEE Internet Things J. 5 (1) (2018) 108–120.

18. I. Kovacevic, A.S. Shafigh, S. Glisic, B. Lorenzo, E. Hossain, Multi-domain network slicing with latency equalization, IEEE Trans. Netw. Ser. Manage. 17 (4) (2020) 2182–2196.

НУБіП України

19. T. Huu, R. Mohan, M. Gurusamy, Service chain embedding for diversified 5G slices with virtual network function slicing, IEEE Commun. Lett. 23 (5) (2019) 826–829.

20. F. Bahlke, O.D. Ramos-Cantor, S. Henneberger, M. Pesavento, Optimized cell planning for network slicing in heterogeneous wireless communication networks, IEEE Commun. Lett. 22 (8) (2018) 1676–1679.

21. H. Yao, X. Chen, M. Li, P. Zhang, L. Wang, A novel reinforcement learning algorithm for virtual network embedding, Neurocomputing 284 (2018) 1–9.

22. T. Li, X. Zhu, X. Liu, An end-to-end network slicing algorithm based on deep Q-learning for 5G network, IEEE Access 8 (2020) 122229–122240.

23. K. Gai, M. Qiu, Optimal resource allocation using reinforcement learning for IoT content-centric services, in: Applied Soft Computing, Vol. 70, Elsevier, 2018, pp. 12–21.

24. A. Termehchi, M. Rasti, Joint sampling time and resource allocation for power efficiency in industrial cyber–physical systems, IEEE Trans. Ind. Inform. 17 (4) (2021) 2600–2610.

25. D. Wang, N. Zhao, B. Song, P. Lin, F.R. Yu, Resource management for secure computation offloading in softwarized cyber–physical systems, IEEE Internet Things J. 8 (11) (2021) 9294–9304.

26. K. Gai, M. Qiu, H. Zhao, X. Sun, Resource management in sustainable cyber-physical systems using heterogeneous cloud computing, IEEE Trans. Sustain. Comput. 3 (2) (2018) 60–72.

27. S. Luo, Y. Wen, W. Xu, D. Puthal, Adaptive task offloading auction for industrial CPS in mobile edge computing, IEEE Access 7 (2019) 169055–169065.

28. H. Mo, G. Sansavini, Dynamic defense resource allocation for minimizing unsupplied demand in cyber–physical systems against uncertain attacks, IEEE Trans. Reliab. 66 (4) (2017) 1253–1265.

НУБіП України

29. K. Chang, K. Chu, H. Wang, Y. Lin, J. Pan, Agent-based middleware framework using distributed CPS for improving resource utilization in smart city, in: Future Generation Computer Systems, Vol. 108, Elsevier, 2020, pp. 445–453.

30. J. Zhao, Q. Dong, Allocation algorithm of CPS communication resources based on cooperative game, Comput. Commun. 160 (2020) 63–70.

31. S. Liu, Z. Cai, H. Xu, M. Xu, Towards security-aware virtual network embedding, Comput. Netw. 91 (11) (2015) 151–163.

32. T.H. Cormen, C. Stein, R. Rivest, C. Leiserson, Introduction to Algorithms, second ed., McGraw-Hill Higher Education, 2001.

33. G. Golub, C. van Van Loan, Matrix Computations, third ed., in: Johns Hopkins studies in Mathematical Sciences, Johns Hopkins University Press, 1996.

34. S. Boyd, L. Vandenberghe, Convex Optimization, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K, 2009.

35. H. Cao, S. Hu, L. Yang, New functions added to ALEVIN for evaluating virtual network embedding, in: 2016 IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), 2016, pp. 2411–2414.

36. H. Cao, et al., Resource-ability assisted service function chain embedding and scheduling for 6G networks with virtualization, IEEE Trans. Veh. Technol. 70 (4) (2021) 3846–3859.

37. S. Huang, B. Guo, Y. Liu, 5G-oriented optical underlay network slicing technology and challenges, IEEE Commun. Mag. 58 (2) (2020) 13–19.

НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України
НУБіП України