

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)

Математична модель управління drones
в одній "Swarm-bot" - system

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи КСМм-22-1
Швецов К.О.
(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)

2024 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 _____ Швецову Кирилу Олеговичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Математична модель управління drones в одній "Swarm-bot" - system _____

затверджена наказом по університету від “ 06 ” листопада 2023 р. № 1298Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 15 січня 2024р. _____

3. Вхідні дані до роботи _____ 1) дослідити модифікований алгоритм К. Рейнольдса для
_____ можливості групового руху drones у формі строю; 2) провести огляд та аналіз
_____ загальних принципів в управлінні drones в одній «Swarm-bot» - system; 3) провести
_____ огляд та аналіз правил К. Рейнольдса; 4) провести експериментальні дослідження
_____ методів кінематичного та динамічного управління drones у «Swarm-bot» - system. _____

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 – 22 слайди

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	07.11.23 - 13.11. 23	
2	Вибір та обґрунтування методики дослідження	14.11. 23 - 20.11. 23	
3	Вибір інструментальних засобів	21.11. 23 - 23.11. 23	
4	Розробка моделей протоколів	24.11. 23 - 06.12. 23	
5	Проведення експериментів	07.12.23 - 23.12.23	
6	Оформлення матеріалів кваліфікаційної роботи	26. 12. 23 - 02.01. 24	
7	Подання кваліфікаційної роботи керівникові та її попередній захист	03. 01. 24 - 06.01. 24	
8	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	09.01.24 - 12.01. 24	

Дата видачі завдання 06 листопада 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 62 с., 21 рис., 1 табл., 1 дод., 14 джерел.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, МОДИФІКОВАНИЙ АЛГОРИТМ, ПРИНЦИПИ УПРАВЛІННЯ РЕЙНОЛЬДСА, DRONES, «SWARM-BOT» - SYSTEMS.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження математичної моделі управління drones в одній «Swarm-bot» - system.

У ході виконання кваліфікаційної роботи досліджується математична модель управління drones в одній «Swarm-bot» - system. За основи взято принципи управління Рейнольдса та, з метою забезпечення стройового руху, модель доповнено правилом формації, що регулює груповий рух drones в одній «Swarm-bot» - system, за аналогією із системою матеріальних тіл, з'єднаних пружинами. Модифікований алгоритм Рейнольдса використано для вирішення плоскої кінематичної задачі та плоскої динамічної задачі управління drones в одній «Swarm-bot» - system.

Математична модель управління drones в одній «Swarm-bot» - system вирішує завдання переміщення drones, що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system, з довільних початкових станів до довільних кінцевих станів.

ABSTRACT

Master's thesis: 62 pages, 21 figures, 1 tables, 1 appendices, 14 sources.

DRONES, MATHEMATICAL MODEL, MODIFIED ALGORITHM, PRINCIPLES OF REYNOLDS CONTROL, «SWARM-BOT» - SYSTEMS.

The purpose of the qualification work is to study the mathematical model of control of drones in one «Swarm-bot» - system.

In the course of the qualification work, the mathematical model of control of drones in one «Swarm-bot» - system is investigated. The principles of Reynolds control are taken as the basis, and in order to ensure formation movement, the model is supplemented with a formation rule that regulates the group movement of drones in one «Swarm-bot» - system, by analogy with the system of material bodies connected by springs. The modified Reynolds algorithm is used to solve the flat kinematic problem and the flat dynamic problem of controlling drones in one «Swarm-bot» - system.

The mathematical model of control of drones in one «Swarm-bot» - system solves the task of moving drones that are part of one «Swarm-bot» - system from arbitrary initial states to arbitrary final states.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	7
ВСТУП	8
1 ОГЛЯД МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ DRONES В ОДНІЙ «SWARM-BOT» - SYSTEM.....	10
1.1 Управління поодиноким drone.....	10
1.2 Огляд існуючих рішень у галузі управління поодиноким drone.....	14
1.3 Огляд існуючих рішень у сфері управління групою drones	17
2 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ В УПРАВЛІННІ DRONES В ОДНІЙ «SWARM-BOT» - SYSTEM.....	25
2.1 Вимоги до алгоритму групового управління drones	26
2.2 Методи управління drones в одній «Swarm-bot» - system.....	31
2.2.1 Методи управління рухом drones в режимі «строевий порядок» в одній «Swarm-bot» - system	32
2.2.2 Методи управління рухом drones в режимі «Swarm» в одній «Swarm-bot» - system	34
2.3 Модифікація алгоритму Крейга Рейнольдса.....	36
2.4 Тривимірна динамічна задача.....	37
3 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДОСЛІДЖЕНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ DRONES, ЩО ВХОДЯТЬ У СКЛАД ОДНІЄЇ «SWARM-BOT» - SYSTEM	42
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

МСО – мережа, яка самоорганізується

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференційний

ПЗ – програмне забезпечення

GPS – система глобального позиціонування (англ., Global Positioning System)

NDVI – нормалізований вегетаційний індекс (англ., Normalized Difference Vegetation Index)

ВСТУП

В даний час drones, які по суті є літаючими «s-bots», складають фундамент наукових досліджень у багатьох сферах. Замінюючи пілотовані транспортні засоби, drones мають перевагу у складних та небезпечних середовищах. Їхня надійність у важких для людини умовах набагато вища. Літальні засоби з нерухомим крилом (літаки, планери) є транспортними засобами дальньої дії, а також мають високу енергоефективність. Однак, вони мають недолік у маневреності. Наприклад, аеростати легко управляються, коли вітер незначний, і їх підйом здійснюється завдяки природній плавучості, але вони мають обмежену маневреність. Helicopters мають переваги над аеростатами і звичайними повітряними суднами з нерухомим крилом у завданнях спостереження та обстеження, оскільки мають високу маневреність, можуть здійснювати вертикальний зліт і посадку в обмежених просторах і зависати в просторі над різними об'єктами. Зростаюча популярність drones в класі міні-drones пояснюється перевагами цих гвинтокрилих апаратів. Володіючи всіма перевагами літальних апаратів вертолітного типу, drones, на відміну від helicopters, мають простий та економічний механізм з фіксованими осями пропелерів, що не потребує складного технічного обслуговування. Прогресуюча популярність наочно підтверджує глобальне зростання ринку drones як в історичній ретроспективі, так і в прогнозі аналітичних агентств. Сьогодні drones активно використовуються в кіновиробництві та аерофотозйомці, в інспекції інфраструктурних об'єктів, у сільському господарстві. В якості приклада комерційного застосування можна назвати процес доставки drones малогабаритних вантажів до клієнтів ритейлером Amazon. Ідея створення «Swarm-bot» - system на базі drones почала розвиватися зовсім недавно і має перспективи широкого застосування. Порівняно з поодиноким drone, «Swarm-bot» - system, що складається з drones,

має розширене знання навколишнього середовища за рахунок комунікації всередині групи, підвищену надійність за рахунок взаємозамінності drones, та здатність колективно швидше виконувати більш складні завдання. Тому, дослідження математичної моделі управління drones в одній «Swarm-bot» - system є актуальним науковим завданням.

1 ОГЛЯД МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ DRONES В ОДНІЙ «SWARM-BOT» - SYSTEM

1.1 Управління поодиноким drone

В даний час у літаючих «s-bot»-drones набула широкого поширення платформа на багатороторній технології під назвою – квадрокоптер. Ця платформа виконана у вигляді хреста з рівними сторонами, на кінцях яких встановлені ротори з приводами (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Приклад платформи drone на багатороторній технології під назвою квадрокоптер

Усі ротори мають фіксовану вісь. Підйомна сила, що виникає в результаті обертання ротора, перпендикулярна до платформи drone. Отже,

рівнодіюча підйомна сила завжди перпендикулярна до платформи drone. Величина підйомної сили залежить від швидкості обертання роторів. Вертикальний політ drone здійснюється за рахунок вертикальної складової рівнодіючої підйомної сили, яка долає силу тяжіння. Горизонтальний політ здійснюється за рахунок горизонтальних складових підйомних сил, що виникають при нахилі drone. Нахилити drone можна за допомогою регулювання швидкостей обертання роторів, створюючи перекидаючий момент щодо осей x або y . На рисунку 1.2. представлено drone, який рухається вправо, а на рисунку 1.3. представлено drone, який рухається донизу.

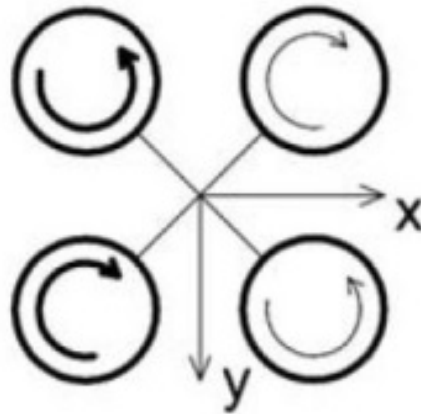


Рисунок 1.2 – Принцип руху drone вправо

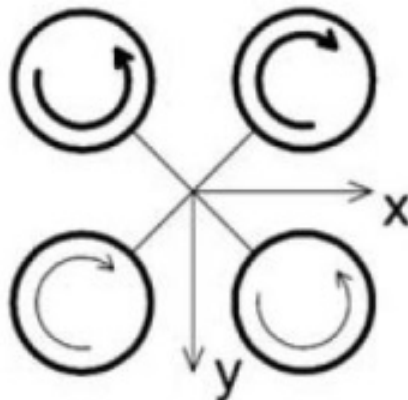


Рисунок 1.3 – Принцип руху drone донизу

Для цього досить встановити різну швидкість обертання між роторами, що знаходяться один проти одного по діагоналі. Якщо одна пара роторів, розташованих один проти одного по діагоналі, обертається за годинниковою стрілкою, інша пара обертається проти годинникової стрілки. Справа в тому, що при обертанні гвинта виникає момент, що обертає drone навколо власної осі у зворотний бік.

Якщо обертати пропелери попарно в різні сторони, то і момент, що діє на тіло drone і виникає в результаті обертання пари роторів за годинниковою стрілкою, компенсуватиметься моментом, що виникає в результаті обертання пари роторів проти годинникової стрілки. У helicopters цю функцію виконує хвостовий гвинт, який компенсує момент, що виникає в результаті обертання несучого гвинта helicopter. Обертання навколо власної осі здійснюється за рахунок різниці швидкостей обертання між парами роторів, що обертаються в різні боки (рисунок 1.4).

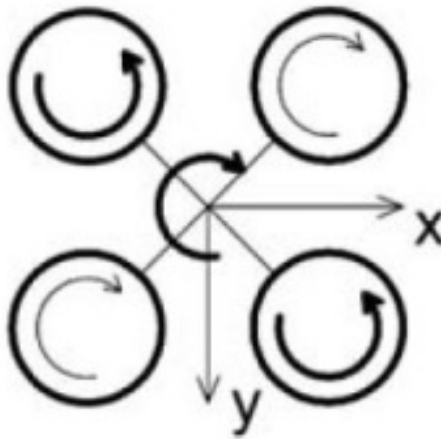


Рисунок 1.4 – Приклад обертання drone навколо власної осі за годинниковою стрілкою

У загальному випадку до складу механічної складової базової платформи drone входять (рисунок 1.5):

- рама;
- шасі;

- ротори;
- плата керування;
- блок акумуляторів;
- електроприводи;
- контролери приводів;
- різні датчики;
- відео камера.

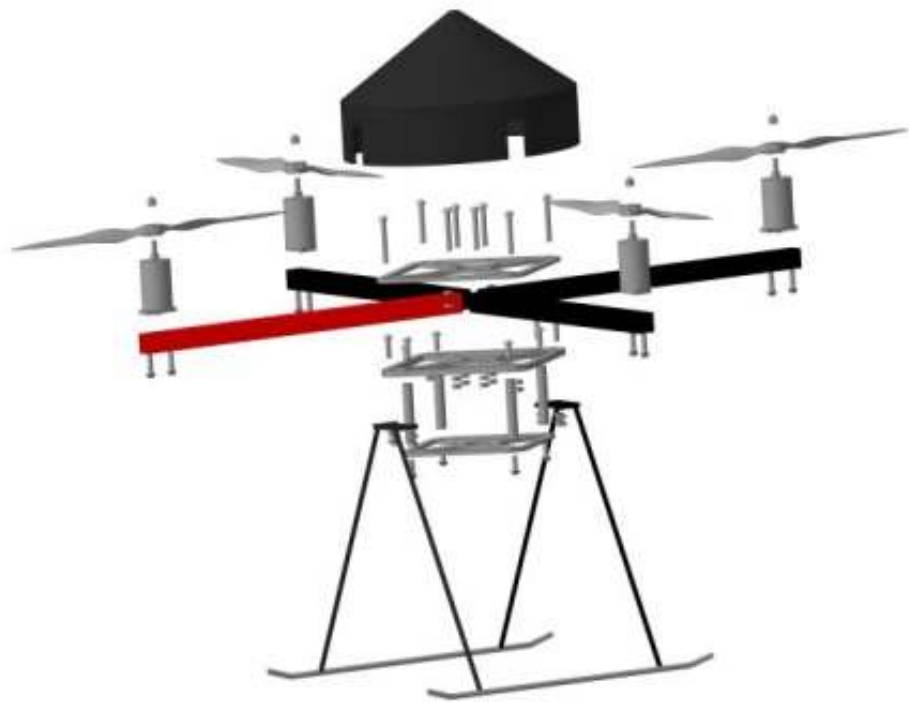


Рисунок 1.5 – Приклад механічної складової базової платформи drone

Зворотний зв'язок по кутовій орієнтації забезпечується інерційним вимірювальним блоком – датчик IMU-Inertial-measurement unit, що представляє комбінацію гіроскопів, акселерометрів та магнітометрів для вимірювання:

- кута крену;
- кута тангажу;

- кута нищпорення;
- кутових швидкостей.

Для визначення місцезнаходження використовуються датчики глобального позиціонування GPS. Додатково drone може бути оснащений компасом, альтиметром для вимірювання висоти польоту, системою технічного зору, лазерним далекоміром та іншими датчиками. Рівень автономності drone буває різним. При деяких завданнях управління drone може вестись оператором із наземної робочої станції.

В цьому випадку drone знаходиться в зоні видимості оператора та/або зображення з бортової камери транслюється на екран робочої станції, оператор при цьому може задавати маршрут і траєкторію руху drone. Оперативне управління drone за швидкістю може здійснюватися джойстиком радіопульта, застосовуючи прості команди.:

- «вгору»;
- «вниз»;
- «направо»;
- «ліворуч».

У середньому drones можуть важити від 0,1 кг до 4 кг, здійснювати політ 30 - 50 хвилин на одному заряді акумуляторів, розвивати швидкість до 110 км/год, піднімати вантаж до 3-х кг і відлітати на відстань до 12 км. На практиці drones вважаються літальними апаратами «ближнього радіусу дії», що в першу чергу пов'язане з обмеженістю польоту. Дальність польоту сучасних drones складає в середньому 3-4 км.

1.2 Огляд існуючих рішень у галузі управління поодиноким drone

При проведенні огляду та аналізу наукової літератури стало відомо, що існує досить багато наукових статей, присвячених тематиці управління drones, включаючи розробку динамічної моделі, алгоритму управління, моделювання

руху та експериментальні дослідження руху реальних зразків drones. Спосіб управління drones в даний час базується на:

- пд – пропорційно-диференціальних регуляторах;
- під – пропорційно-інтегрально-диференціюючих регуляторах;
- лінійно-квадратичних регуляторах;
- нечітких регуляторів;
- нейромережових регуляторах;
- рекурсивного методу стабілізації.

При проведенні огляду та аналізу наукової літератури з управління параметрами польоту drone по заданій траєкторії було виявлено малу кількість публікацій у цій галузі.

В одній з наукових статей група дослідників з аерокосмічної лабораторії Массачусетського Технологічного Інституту описує застосування методу управління, де вплив, що управляє, розраховується на основі ПД - регулятора, а при виведенні рівнянь руху використовуються кватерніони. Відмінною рисою роботи є використання ротора зі змінним кроком і додатковим приводом замість стандартного пропелера з фіксованим кутом атаки.

Така зміна дає можливість змінювати підйомну силу не тільки регулюванням швидкості обертання ротора, а й кута атаки, що дозволяє підвищити маневреність drone, а також перевертати платформу літального апарату та здійснювати політ у перевернутому стані (у цьому випадку кут атаки пропелерів встановлюється таким чином, що підйомна сила діє у зворотному напрямку). Автори цієї наукової статті апробували таку конструкцію та спосіб управління у натурних експериментах.

Інша група дослідників зі Стендфордського Університету у своєму методі управління також використовувала ПД-регулятори для мікроконтролерів управління кутовою орієнтацією та висотою польоту. Робота відрізняється глибоким дослідженням динамічної моделі руху drone з урахуванням аеродинаміки корпусу літального апарату.

Автори цієї наукової роботи показують, що:

- ефект «биття лопаті»;
- зміна підйомної сили за рахунок додаткового потоку повітря, що набігає;
- ефект відбитого від землі потоку повітря при посадці та зльоті;
- гіроскопічний момент та інші аеродинамічні ефекти – незначно впливають на малих швидкостях, наприклад, у режимі зависання, проте вже на середніх швидкостях їх вплив посилюється.

У науковому співтоваристві одна з дослідницьких груп, Університету Пенсільванії продемонструвала результати та відеоролики експериментів з drones. Ці експерименти вражають різкістю, спритністю та маневреністю руху drones, що використовують метод керування на основі ПД-регулятора та автоматичну генерацію оптимальної траєкторії польоту. У статті автори аргументують, що drones розміром 0,1 - 0,5 метра і вагою 0,1 - 0,5 кілограма значно маневреніші, отже, при проектуванні приділяють велику увагу розміру і вазі літального апарату. Дослідники Університету Пенсільванії успішно вирішили низку практичних завдань, таких як:

- уникнення зіткнення з динамічними перешкодами;
- захоплення об'єкта під час польоту за допомогою прикріпленого пристрою схвату за аналогією з полюванням хижих птахів на рибу;
- посадка на похилу або вертикальну стіну та інші нетривіальні завдання.

Практичну цінність вирішення цих завдань знижує той факт, що для роботи системи управління drones потрібні точні координати розташування літального апарату в кожний момент часу, що забезпечувалося обмеженням руху в лабораторних умовах, де була встановлена система камер, які відстежують спеціальний маркер на drone. Враховуючи цей недолік, дослідники розробили універсальну модель drone, оснащену широким набором датчиків, включаючи датчик GPS, бортові камери та лазерний

сканатор, і здатну здійснювати політ як усередині приміщень, так і поза. Відмінною особливістю при цьому є можливість будувати 3D карту місцевості під час польоту.

У серії спільних робіт дослідників з інститутів Флориди, Мічигана та Сан-Дієго, автори вперше для управління кутовою орієнтацією drones використовували помилку по матриці повороту, що дозволило обійтися без віднімання кутів і пов'язаною із цим сингулярності.

В якості інших, вартих уваги робіт, присвячених системі управління drones, можна виділити статтю групи вчених, де алгоритм управління заснований на ПД - регуляторі та резюмована теорія аеродинаміки гвинта. Також відомі алгоритми управління та планування траєкторії руху drones, які синтезовані на основі методів оптимального управління з мінімізацією часу руху та перевіркою здійсненності траєкторії. Також були розглянуті завдання уникнення зіткнення, зльоту та посадки.

У кваліфікаційній роботі досліджується комбінований алгоритм управління рухом drone за швидкістю та траєкторією.

1.3 Огляд існуючих рішень у сфері управління групою drones

Група drones представляє з себе «Swarm-bot» - system, що складається з автономних інтелектуальних «s-bot», які локально обмінюються інформацією один з одним і взаємодіють з physical environment, колективно вирішуючи завдання, які складно чи неможливо вирішити за допомогою одного drone.

«Swarm-bot» - system, що складається з drones, має переваги щодо поодинокого drone:

- взаємозамінність у випадках позаштатних ситуацій;
- розширена поінформованість про physical environment за рахунок комунікації всередині групи;
- підвищена надійність та швидкість виконання завдань та здатність

колективно виконувати більш складні завдання.

У кваліфікаційній роботі досліджуються два режими групового руху drones:

- режим «стройового руху» – упорядкований груповий рух drones із збереженням заданої геометричної топології: клин, сітка, ланцюжок та інші формації. У побудові при цьому встановлено дворівневу ієрархію: провідні та ведені drones. Недоліком такого режиму є залежність відомих drones від drones - лідерів, вихід з ладу яких може розформувати лад, якщо не врахувати цю проблему;

- режим «swarm movement» – колективний рух у «Swarm-bot» - system без необхідності витримувати певну геометричну топологію. Такий режим може бути гнучкішим при позаштатних ситуаціях.

Ідеї swarm – інтелекту виходять із природи та біологічних систем, де багато прикладів зграйної поведінки тварин (рисунки 1.6 - 1.8), що дозволяє їм більш ефективно добувати їжу та виживати.



Рисунок 1.6 – Приклади «Swarm» поведінки в природі – мурахи разом добувають їжу



Рисунок 1.7 – Приклади роєвої поведінки в природі. Ставриди, об'єдналися в тороподібну форму, збиваючи з пантелику хижаків



Рисунок 1.8 – Приклади роєвої поведінки у природі – міграція зграї птахів

Під swarm-інтелектом мають на увазі «Swarm-bot» - system, що самоорганізується, сумарна поведінка drones якої представляє інтелектуальну та розумну поведінку всієї «Swarm-bot» - system. Прикладами класичних методів групового управління, побудованих на принципах swarm-інтелекту, є алгоритм рою частинок, алгоритм Рейнольдса, мурашиний алгоритм, бджолиний алгоритм та інші алгоритми, а також їх модифікації. У сучасній

науковій літературі, присвяченій колективному управлінню в «Swarm-bot» - system, визначено три стратегії групового управління «s-bots»:

- централізована стратегія – полягає в наявності одного або декількох координуючих центрів або центральних пристроїв управління, які формують команди для «s-bots». Перевагою такого підходу є простота організації централізованої стратегії та, отже, алгоритмізації, однак, зі збільшенням числа «s-bots» та складності завдання така стратегія може виявитися неефективною, оскільки на централізоване управління покладається складне завдання оптимізації дій усіх «s-bots» для досягнення групової мети. Іншим недоліком централізованого управління є вразливість усієї «Swarm-bot» - system в частині залежності від координуючого центру, вихід з ладу якого чи втрата каналу комунікації може призвести до виходу з ладу всієї «Swarm-bot» - system. Крім цього, радіус дії зв'язку координаційного центру накладає обмеження на допустиму віддаленість «Swarm-bot» - system через можливі несправності або затримки сигналів;

- децентралізована стратегія – передбачає відсутність у «Swarm-bot» - system єдиного управляючого центру формування координаційних команд, а кожен «s-bots» незалежно приймає рішення про свої дії, прагнучи принести користь для досягнення групової мети. Така стратегія управління «s-bots» масштабована та має високу надійність, але складна в алгоритмізації. Swarm-інтелект має на увазі децентралізовану стратегію управління. Крім безлічі прикладів систем з подібною стратегією у природі (рисунки 1.6 - 1.8), можна навести приклад з життя людей – командна гра, наприклад такі як футбол та хокей;

- змішана стратегія – полягає в періодичному втручанні центру управління в «Swarm-bot» - system з децентралізованою стратегією управління, наприклад, для постановки мети, а тактичне виконання групових завдань відбувається без участі центру управління. Такий підхід передбачає гнучкість у поєднанні принципів централізованого та децентралізованого управління.

Паралельно процесу постійного здешевлення та зменшення розмірів елементної бази, спостерігається тенденція переходу від централізованого до децентралізованого підходу там, де це допустимо та доцільно. В управлінні великими та дорогими «s-bots» (наприклад, автономні підводні човни) найчастіше використовується централізований метод із залученням людини - оператора, що пояснюється необхідністю більш вищого контролю для нівелювання ризику втрати та некоректних дій подібного апарату.

У кваліфікаційній роботі досліджується децентралізована чи змішана стратегія групового управління drones. Як було зазначено раніше, у «Swarm-bot» - system drones мають можливість локально обмінюватися інформацією для коригування своїх дій. У випадку drone, в якості комунікаційної бази для технічної реалізації внутрішнього зв'язку можуть служити радіомодулі Xbee із частотою 2.4 ГГц, функціонуючі в широкоповсюдному режимі та розповсюджуючі пакети даних без встановлення контакту з певним drone. Таким чином, кожен автономний drone може передавати та приймати пакети даних:

- ідентифікатор drone;
- глобальне розташування drone;
- швидкість польоту drone;
- кут нищпорення drone, джерела яких знаходяться в зоні чутності drone, обмеженою дальністю зв'язку 50 - 100 метрів.

Згідно з дослідженнями, таку дальність зв'язку мають птахи у зграї. Затримка передачі даних при цьому може становити близько 0,4 секунд, що може бути проблемою для ефективної роботи алгоритму децентралізованого управління drones в «Swarm-bot» - system. У кваліфікаційній роботі приймається припущення, що обміну інформацією в зоні чутності drone відбувається миттєво і проблема затримки сигналу не досліджується. Тим не менш, аналізується вплив шумів у датчиках GPS без застосування фільтрів. Для прикладу можна розглянути завдання картування сільськогосподарських площ. Група drones з децентралізованим управлінням може бути використана

для вирішення низки практичних завдань у сільському господарстві. Виробничий процес у рослинництві відбувається на масштабних територіях, де розташовані значні світові ресурси родючого чорноземного ґрунту. Внаслідок цього, активний моніторинг за розвитком посівів людьми є складноздійсненним. Для підвищення якості керування та реагування при утворенні аномальних зон з осередками шкідників та ділянок, що потребують додаткового підживлення добривами, сучасні організації використовують віддалені системи моніторингу.:

- супутникові системи;
- drones.

На drones встановлюють спеціальні інфрачервоні та телевізійні камери, які здатні фіксувати рівень нагріву ґрунтів, рівень відображення від інфрачервоної області спектру та від червоної області спектру, що дозволяє отримувати NDVI карти для аналізу рослинного покриву на основі вегетативного індексу. Такі самі карти виходять за допомогою супутникових знімків. Для того, щоб скласти численні знімки окремих ділянок у цілісне зображення поля, існують спеціальні програмні пакети з технологією суміщення зображень на основі даних GPS. За рахунок більш високої роздільної здатності знімки з drones у порівнянні зі знімками із супутникових систем дозволяють формувати NDVI карти з більш високою деталізацією, що спрощує та підвищує ефективність подальшої обробки. Крім цього, затримка оновлення супутникових знімків може становити понад 5 днів, а також існує ймовірність недоступності знімків у певний період через підвищену хмарність, що є критичним у сільському господарстві. З цих причин спеціалізовані картографічні програми з автоматизованою обробкою NDVI знімків, що працюють на основі знімків з drones, дозволяють генерувати оповіщення та попередження з більшою достовірністю, що дозволяє вживати екстрених заходів для усунення несприятливих факторів розвитку рослин та підвищення врожайності в кінцевому підсумку. Таким чином, системи моніторингу на основі drones є менш доступними порівняно із системами супутникового

моніторингу, але більш ефективними.

На практиці drones виявляються більш затребуваними, оскільки їх можна використовувати і для інших завдань, наприклад для стеження за сільськогосподарською технікою в полях, де потрібна здатність зависання в повітрі. Недоліком використання drones у задачі картування сільськогосподарських площ є обмеженість часу та відстані їхнього польоту. Покриття масштабних площ можливе за умови використання групи drones, керованої оператором як єдине ціле.

Розглянемо переваги застосування групи drones у задачі картування посівів у порівнянні з традиційним підходом, коли оператор управляє одним drone, задаючи область моніторингу (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Приклад планування польоту drones для обстеження сільськогосподарського поля

Для порівняння використовуємо однакову ситуацію, коли потрібно зробити картування поля зі стандартним розміром у 100 гектар правильної квадратної форми зі стороною, що дорівнює 1 км. Аерофотознімання такого поля може бути здійснено drones, обладнаними спеціалізованою камерою (наприклад, моделлю Sony UMC-R10C). При польоті на стандартній висоті 60 м, камера з фокусною відстанню 50 мм і кутом зору 46° буде захоплювати кадр

із шириною в 50 м. Картування може відбуватися при 3 м/с. Максимальна відстань, яку може подолати drone, без перезарядання акумулятора, обмежена 4 км. Шляхом нескладних обчислень можна визначити, що для виконання подібної операції одному drone потрібно пролетіти поле туди - назад 10 разів, що складе більше 20 км шляху, майже 2 години часу без урахування перезарядки і більше 5 годин з урахуванням перезарядки. Тому за заданих умов drone потрібно буде чотири рази направити назад на базу для перезарядання акумуляторів. Група з 10 drone може виконати подібне завдання значно швидше. Вишикувавшись у лінію, «Swarm-bot» - system буде захоплювати сукупну сцену з шириною в 500 м. У такому разі, знадобиться лише 1 раз строем пролетіти поле туди - назад, що складе близько 2,5 км шляху для кожного літаючого drone і займе менше 15 хвилин часу. Звичайно, таких результатів можна отримати, керуючи 10 drones окремо і задаючи кожному свою ділянку обробки, однак такий підхід у порівнянні з груповим управлінням має ряд недоліків:

- по-перше, це ускладнює роботу оператора щодо необхідності завдання маршруту для кожного drone окремо, особливо коли полів багато;
- по-друге, згідно з правилами авіації, drones повинні пересуватися на одній постійній висоті, що створює загрозу зіткнення;
- по-третє, ускладнюється завдання склеювання знімків.

Отже, групове управління drones може оптимізувати процес виробничого моніторингу за сільськогосподарськими посівами у рослинницьких господарствах. Виходячи з цього, в рамках кваліфікаційної роботи було досліджено завдання картування сільськогосподарських площ за допомогою групи автономних дронів. Дослідження математичної моделі проводяться з метою імітаційного моделювання в середовищі MATLAB, що обумовлено її функціональністю.

2 ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ В УПРАВЛІННІ DRONES В ОДНІЙ «SWARM-BOT» - SYSTEM

Теорія управління drones в одній «Swarm-bot» - system набула значного розвитку наприкінці 20 століття разом із появою статей групи вчених: Craig Reynolds, James Kennedy та Russel Eberhart, Yuhui Shi, Tamas Vicsek та інші. Названі вище автори, натхненні прикладами з природи, створили та неодноразово модифікували класичний алгоритм рою частинок для імітації «зграйної» поведінки «s-bot» та drones. З тих пір, кількість робіт, присвячених теорії самоорганізованих «Swarm-bot» - system, неухильно зростає. Основними принципами цих систем є:

- децентралізація управління;
- самостійність кожного «s-bot» в «Swarm-bot» - system;
- обмеженість локальної інформації від сусідніх «s-bot».

Згодом теорія управління для окремих «s-bot» стала застосовуватися в цілому для «Swarm-bot» - system, що складаються з відносно простих та недорогих апаратів. Управління drones почало розвиватися нещодавно. Деякі вчені, які працюють у цій галузі, на основі загальних принципів «Swarm-bot» - system, що самоорганізуються, створили свої базові критерії для групи автономних drones.

Одна з груп провідних дослідників у галузі управління drones з технологічного інституту Джорджії сформулювала наступні п'ять основних принципів:

- простота – small;
- безпека – safe;
- інтелектуальність – smart;
- висока швидкість – speed;
- децентралізованість – swarm.

Постановка таких базових принципів насамперед пов'язана із прагненням створювати та розвивати «Swarm-bot» - system, які здійснюють колективний рух за аналогією зі зграйною поведінкою тварин у природі, а також, виходячи з економічної доцільності у використанні недорогих «s-bot» у якості drones.

2.1 Вимоги до алгоритму групового управління drones

У кваліфікаційній роботі досліджуються принципи, які узагальнені у вигляді структури вимог та критеріїв з метою оцінки якості колективного руху та способу групового управління.

Вимога № 1 – полягає в тому, що спосіб децентралізованого керування drone повинен відповідати шести критеріям:

- безпека;
- згуртованість;
- локальність;
- масштабованість;
- децентралізація;
- взаємозамінність.

Суть кожного критерія представлена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Набір критеріїв для оцінки якості групового руху

№	Критерій	Визначення
1	2	3
1	Безпека	Drones тримаються на безпечній відстані один від одного
2	Згуртованість	Drones рухаються на відносно близьких та схожих дистанціях
3	Масштабованість	Алгоритм працює незалежно від кількості drones

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
3	Локальність	Drones одержують лише локальну інформацію в зоні чутності, яка визначається дальністю зв'язку
5	Децентралізація	Кожен drone має свою незалежну систему управління
6	Взаємозамінність	Drones взаємозамінні. Допускається втрата або набуття нового зв'язку

Оцінка критеріїв проводитиметься по-різному. Безпека руху групи drones визначатиметься мінімальною дистанцією між парою drones (рисунок 2.1), що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system:

$$\min(d_{ij}), \quad (2.1)$$

де d_{ij} – відстань між i -м та j -м drones.

На рисунку 2.1 зображені обмеження згідно з критеріями безпеки та локальності для drones, що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system.

Для дотримання критерію безпеки поставимо умову, що протягом усього часу руху «Swarm-bot» - system мінімальна дистанція між довільною парою drones, що входять до складу цієї «Swarm-bot» - system, повинна бути більшою за безпечну відстань, прийняту для конкретної місії:

$$\min(d_{ij}(t)) > d_s, \quad (2.2)$$

де d_s – величина, що характеризує безпечну відстань, яку слід вибирати в залежності від розмірів drones, середньої швидкості їх руху, похибки систем

позиціонування, затримок зв'язку, допустимого рівня ризику зіткнення та інших факторів (рисунок 2.2).

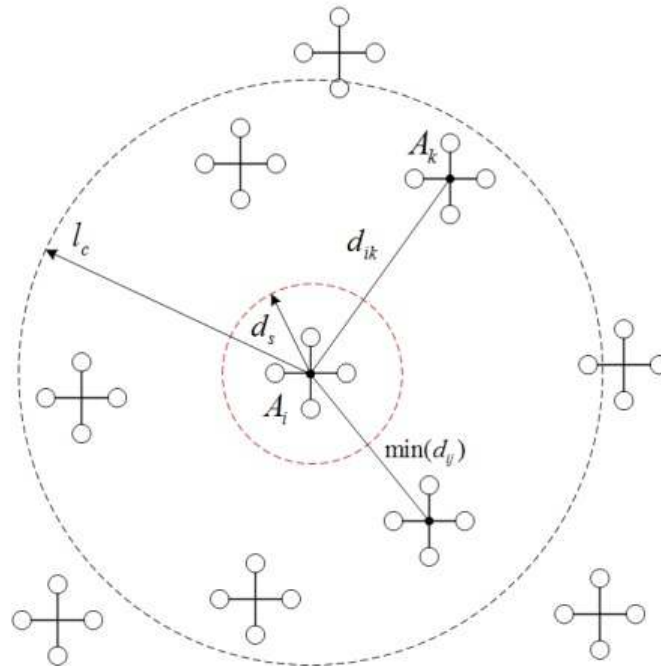


Рисунок 2.1 – Обмеження згідно з критеріями безпеки та локальності для drones, що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system

Оцінка критерію згуртованості також проводитиметься в залежності від відстаней між дронами. В даному випадку, чим компактніше рухається група drones, тим вона згуртованіша. В якості оцінки згуртованості будемо використовувати середньоарифметичну відстань до найближчого сусіднього drone з допустимим середньоквадратичним відхиленням:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i(t) \pm \sigma(t), \quad (2.3)$$

де (t) – відстань від i -го drone до найближчого drone, як функція від часу;

n – кількість drones у групі;

$\sigma(t)$ – середньоквадратичне відхилення.

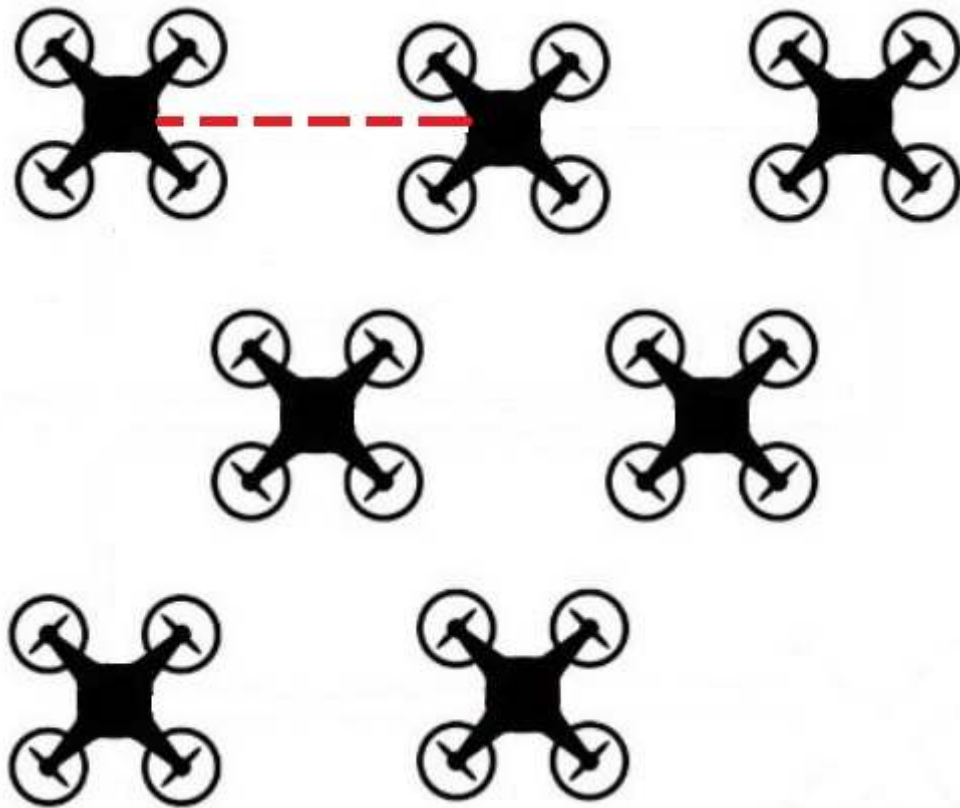


Рисунок 2.2 – Приклад дотримання критерію безпеки між довільною парою drones

Для дотримання критерію згуртованості поставимо обмеження:

$$\begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i(t) < d_c, \\ \sigma(t) < \sigma_0 \end{cases}, \quad (2.4)$$

де d_c – максимально допустима середньоарифметична відстань до найближчого drone;

σ_0 – максимально допустиме середньоквадратичне відхилення.

Очевидно, що має виконуватися нерівність:

$$d_c - \sigma_0 > d_c. \quad (2.5)$$

Як умову критерію локальності поставимо обмеження на радіус зв'язку – l_c кожного drone, в межах якого він може обмінюватися інформацією з іншим drone. Критерії масштабованості, децентралізації та взаємозамінності drones складно виміряти кількісно. Дотримання цих вимог буде оцінено в залежності від виконання визначень, сформульованих у таблиці 2.1.

Вимога № 2 – полягає в тому що «Swarm-bot» - system, що складається з drones, повинна бути здатна здійснювати груповий політ у тривимірному просторі у двох режимах:

- режим «стройового руху» drones;
- режимі «Swarm руху» drones.

Такий гнучкий підхід (рисунок 2.3 і рисунок 2.4), що дозволяє використовувати переваги кожного режиму в залежності від місії «Swarm-bot» - system, не був виявлений при проведенні огляду відкритих публікацій в області групового управління drones.

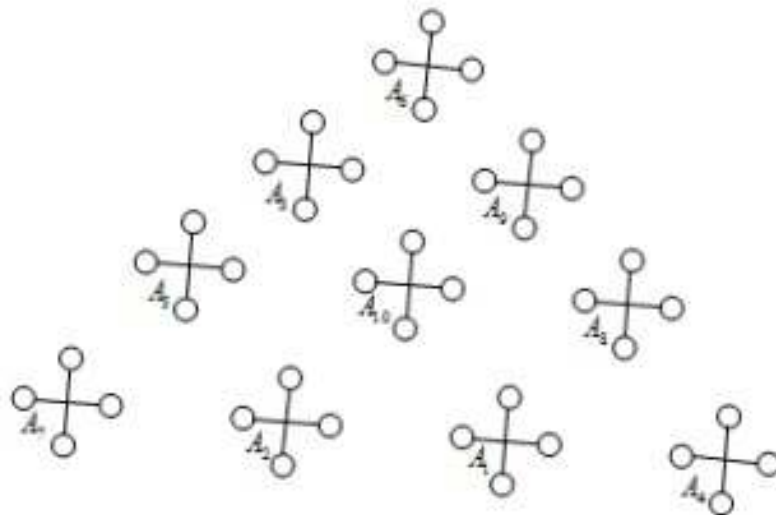


Рисунок 2.3 – Приклад режиму стройового польоту drones у формації «клин»

Вимога № 3 – є умовою змішаної стратегії управління групою drones і полягає в тому, щоб передбачити можливість для оператора вибрати одного

довільного drone для віддаленого управління траєкторією або за швидкістю з координаційного центру. В режимі «Swarm руху» такий підхід дозволить впливати на поведінку групи «зсередини» за допомогою drone, керованого оператором. У режимі «стройового руху» можливість зміни та управління drone лідером, щодо якого ведені drones розраховують своє місце розташування у формації, дозволить нівелювати ризик втрати лідера та більш гнучко керувати строєм у режимі реального часу. Подібна особливість групового управління drones також не була виявлена під час проведення огляду наукових публікацій, доступних у відкритій світовій літературі.

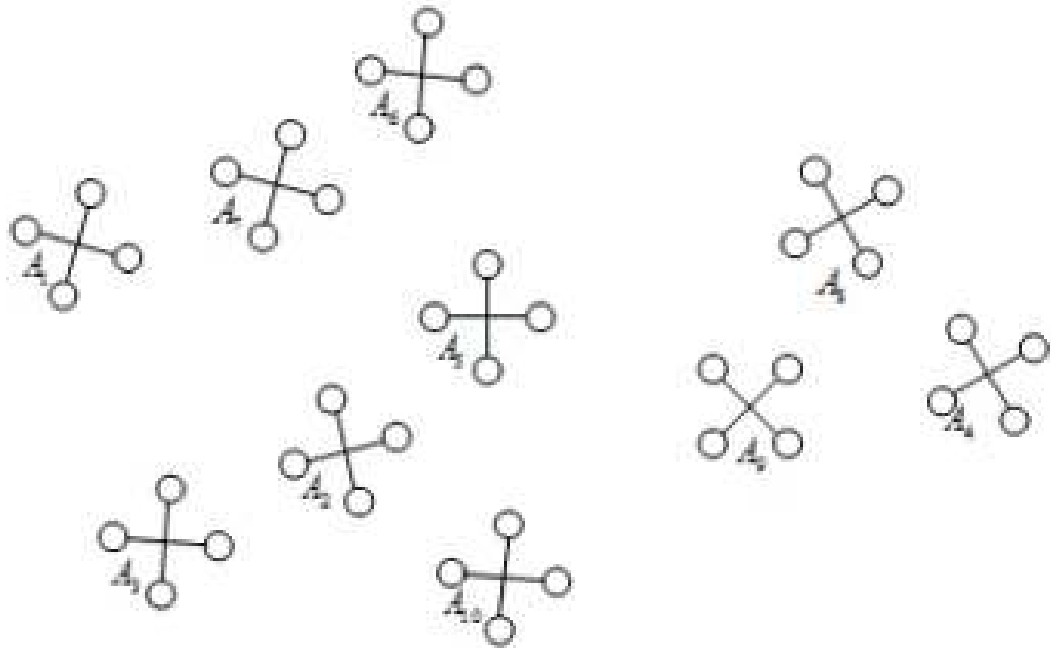


Рисунок 2.4 – Приклад режиму «Swarm руху» польоту drones

2.2 Методи управління drones в одній «Swarm-bot» - system

Згідно з наведеними вище вимогами, необхідно, щоб алгоритм групового управління рухом drones підтримував два режими:

- режим руху «строєвий порядок»;
- режим руху «Swarm».

Існуючі класичні методи управління рухом drones в одній «Swarm-bot» - system припускають рішення лише однієї з цих задач. Для комбінації управління рухом drones у режимі «строєвий порядок» та управління в режимі «Swarm» виникає необхідність у модифікації існуючого методу управління рухом drones в одній «Swarm-bot» - system та побудови на його основі математичної моделі управління рухом drones в одній «Swarm-bot» - system.

2.2.1 Методи управління рухом drones в режимі «строєвий порядок» в одній «Swarm-bot» - system

Теорія стройового управління, особливо у застосуванні до drones, досить поширена. У більшості випадків для вирішення стройової задачі, де мається на увазі збереження топології відносного розташування drones, використовуються такі підходи.

Підхід № 1 – заснований на застосуванні теорії твердості графів. Цільова структура ладу задається за допомогою графа, вершини якого відповідають бажаному розташуванню drones, а ребра – цільовим відстаням r_0^{ij} між парами drones. Таким чином, кожен drone, знаючи координати сусідніх drone, прагне відповідати набору просторових обмежень $r^{ij}(t) \rightarrow r_0^{ij}$ під час руху строем, за умови, що система обмежень є здійсненою.

Недоліками цього підходу є негнучкість, неможливість задавати орієнтацію ладу щодо напрямку руху, ризик порушення властивостей жорсткості графа при виході з ладу провідного drone, щодо якого в більшості випадків збудований граф, і невизначеність поведінки drones у ситуації, коли початкове розташування drones значно відрізняється від цільової формації;

Підхід № 2 – заснований на правилах консенсусу, що передбачає приведення до єдиного значення певного параметра стану drone шляхом усереднення. Однією із задач пошуку консенсусу є завдання «рандеву», що полягає у зборі всіх drones в одній точці. Задача «рандеву» зі зсувом є модифікацією завдання збору в одній точці і передбачає побудову геометричної структури, яка задається кососиметричною матрицею зрушень b_{ij} . Управління drones у цьому випадку може мати такий вигляд:

$$u_i(t) = \sum_{ij} (r_j(t) - r_i(t)) + b_{ij}, \quad (2.6)$$

де $u_i(t) = \dot{r}_i(t)$ – керуючий вплив для i -го drone;

r_i – вектор положення i -го drone;

r_j – вектор положення j -го сусіднього drone;

b_{ij} – задане відносне розташування i -го та j -го drone в «Swarm-bot» - system.

Як і у випадку з першим методом, цей спосіб не передбачає керування орієнтацією строя в залежності від напрямку руху строя.

Підхід № 3 – пов'язаний із застосуванням віртуальних формацій/лідерів. Ключова ідея полягає в тому, що кожен drone слідує за деякою точкою (віртуальним лідером), що рухається за певним законом руху, координати якої розраховуються в центрі управління та передаються drone за допомогою зв'язку.

Задаючи кожному drone точку стеження, можна забезпечити рух із збереженням геометричної структури строя. Проте третій спосіб управління не є децентралізованим і залежить від надійності зв'язку з координаційним центром.

2.2.2 Методи управління рухом drones в режимі «Swarm» в одній «Swarm-bot» - system

«Swarm» управління набуло розвитку з кінця 20-го століття. Крейг Рейнольдс у своїй роботі «Birds», присвяченій симуляції зграйного руху птахів, алгоритмізував поведінку кожного птаха окремо на основі трьох простих правил:

- правило № 1 – «Згуртованість» – полягає в тому, що drones в одній «Swarm-bot» - system намагаються триматися якомога ближче один до одного (рисунок 2.5);

- правило № 2 – «Розділення» – полягає в тому, що drones в одній «Swarm-bot» - system прагнуть розійтися і зберегти безпечну відстань один від одного (рисунок 2.6);

- правило № 3 – «Вирівнювання швидкостей» – полягає в тому, що drones з однієї групи прагнуть рухатися з однаковою швидкістю (рисунок 2.7).

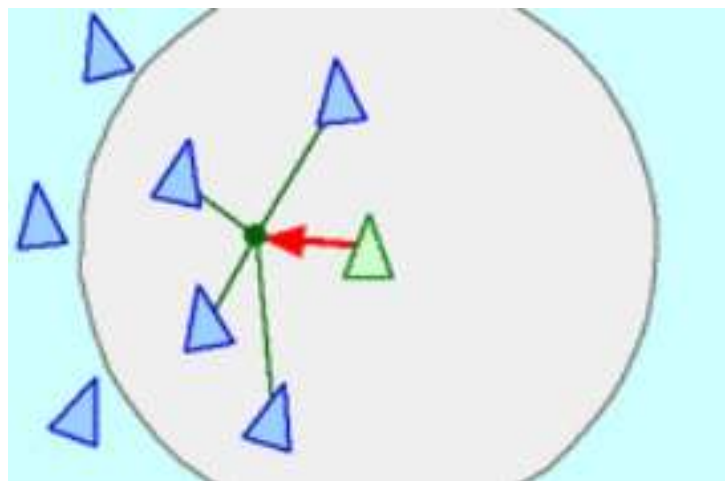


Рисунок 2.5 – Візуалізація першого правила К. Рейнольдса – «Згуртованість»

Декілька років пізніше, в 1995 році, Джеймс Кеннеді і Рассел Еберхарт запропонували науковому співтовариству метод рою частинок для імітації соціальної поведінки. Переміщення частинок підпорядковується принципу

найкращого знайденого у просторі становища, що постійно змінюється під час перебування частинками вигідних положень.

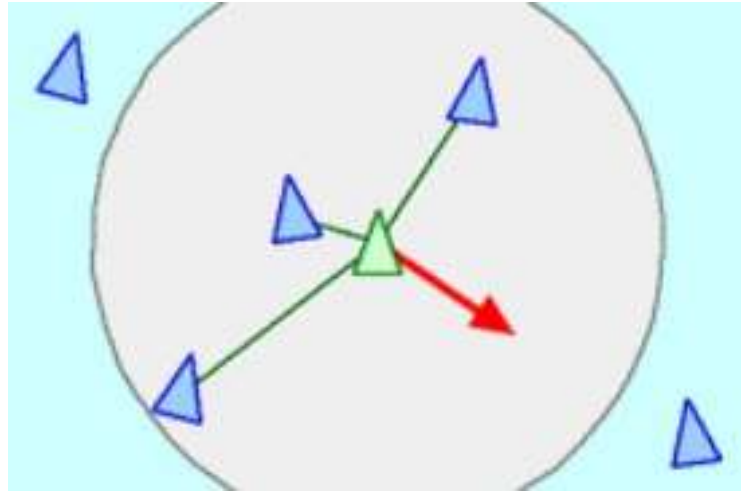


Рисунок 2.6 – Візуалізація другого правила К. Рейнольдса - «Розділення»

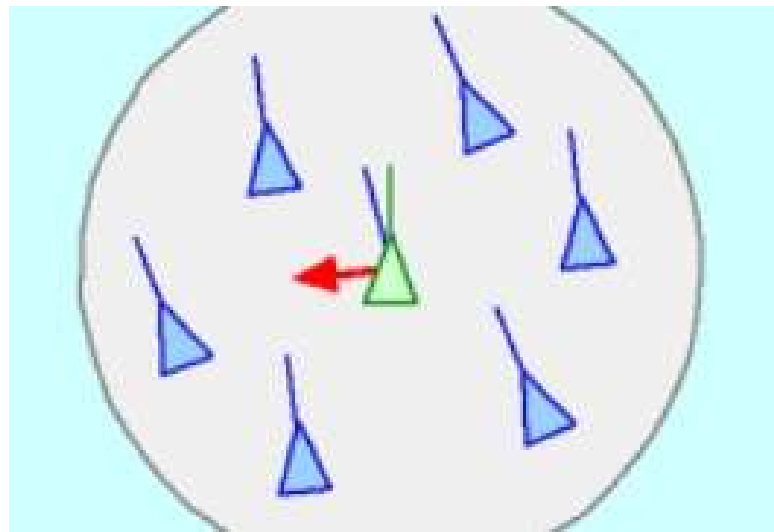


Рисунок 2.7 – Візуалізація третього правила К. Рейнольдса - «Вирівнювання швидкостей»

Управління швидкістю кожної частки має вигляд:

$$v_i(t) = v_i \cdot (t-1) + a_1 \cdot (pbest_i - x_i) + a_2 \cdot (gbest_i - x_i), \quad (2.7)$$

де $v_i(t)$ – швидкість i -ї частки;

$v_i(t-1)$ – швидкість i -ї частки у попередній ітерації;

x_i – положення i -ї частки;

a_1 та a_2 – постійні прискорення;

$pbest_i$ – найкраща знайдена точка i -ї частки

$gbest_i$ – найкраща точка серед усіх, знайдена однією з часток «Swarm».

У наступній ітерації значення найкращих точок оновлюється та цикл повторюється.

На сьогоднішній день одним із найпоширеніших способів для вирішення задачі «Swarm» руху є метод потенційних функцій.

Суть методу полягає в тому, що закон управління drones визначається на основі штучних сил, залежних від потенційної функції або потенційних силових полів, які призводять до притягання drones, або відштовхування. Керуючий вплив при цьому може розраховуватися за таким законом:

$$u_i = \sum_{r_{ij} > r_0} c_1 \cdot r_{ij} + \sum_{r_{ij} \leq r_0} \frac{c_2 \cdot r_{ij}}{r_{ij}^2}, \quad (2.8)$$

де r_{ij} – вектор відстані між i -м та j -м drones;

c_1 та c_2 – настроювані константи методу;

r_0 – радіус силового поля (при $r_{ij} \leq r_0$ drones відштовхуються, при $r_{ij} > r_0$ drones притягуються);

2.3 Модифікація алгоритму Крейга Рейнольдса

За основу алгоритму децентралізованого управління drones в одній «Swarm-bot» - system були взяті правила К. Рейнольдса. Модель Рейнольдса застосовується у випадках, коли допустима «Swarm» поведінка drones в одній «Swarm-bot» - system. При необхідності руху drones із заданою геометричною топологією, потрібна модифікація алгоритму.

Виходячи з цього, додамо четверте правило «Формація» (рисунок 2.8) для забезпечення стройового руху, подібно до системи з матеріальних точок, пов'язаних пружними пружинами.

У такій моделі при відхиленні матеріальної точки виникають сили, що повертають його у вихідну позицію, зберігаючи геометричну топологію. Четверте правило замінюватиме правило «Згуртованості» при режимі польоту строем, правило «Вирівнювання швидкостей» надасть демпфуючу дію, що дозволить виключити автоколивання системи. Вочевидь, що drone, як тверде тіло, на відміну матеріальної точки, крім координат становища, має кутову орієнтацію. Розв'язання задачі регулювання кутової орієнтації при стройовому русі проводиться окремо і полягає в тому, що drones прагнуть вирівняти кут нишпорення щодо лідера.

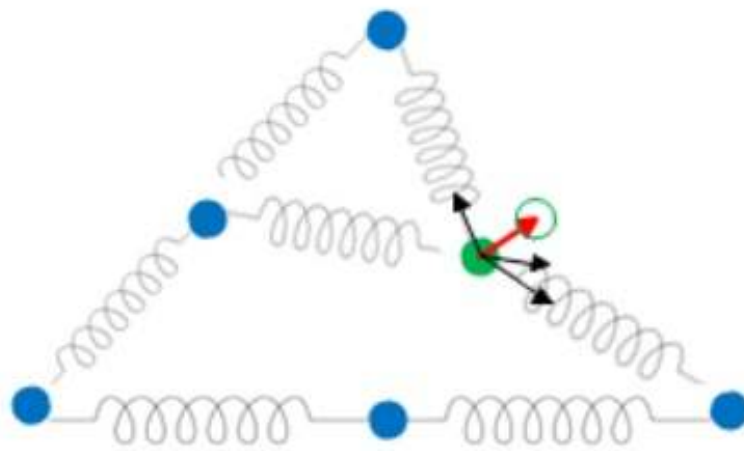


Рисунок 2.8 – Приклад методу потенційних функцій

2.4 Тривимірна динамічна задача

Розглянемо рух обмеженої кількості ідентичних drones A_1, A_2, A_3, A_n з керуючим впливом, рівнянням руху:

$$(u_1, u_2, u_3, u_4)^T = (F_z, M_x, M_y, M_z)^T, \quad (2.9)$$

та вектором стану:

$$[x, y, z, \varphi, \theta, \psi, p, q, r], \quad (2.10)$$

поміщених у зовнішнє середовище E для колективного виконання місій, що задаються оператором на стратегічному рівні. Кількість drones в одній «Swarm-bot» - system позначимо буквою n і вона дорівнюватиме – 10 (рисунок 2.9).

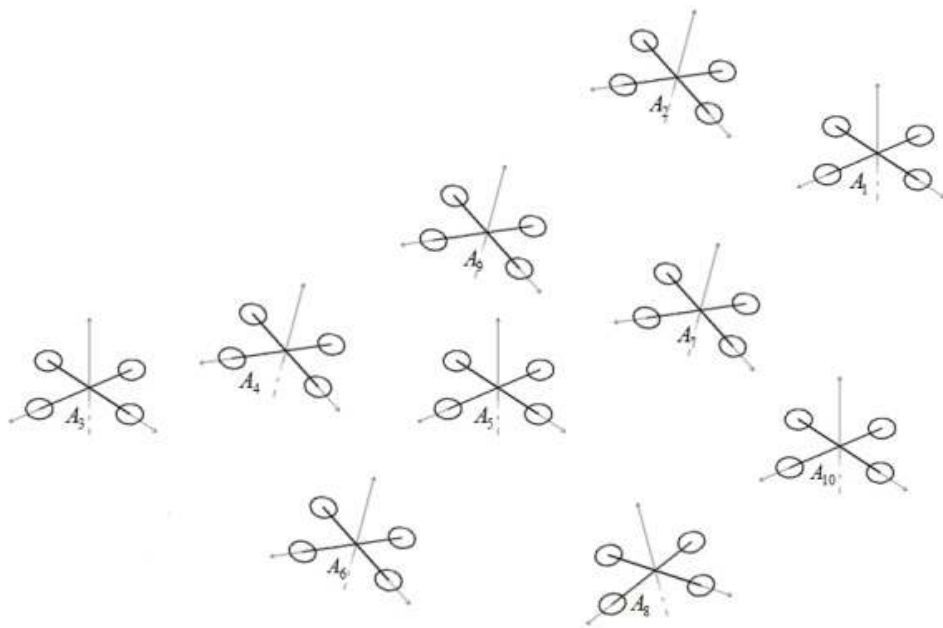


Рисунок 2.9 – Приклад «Swarm-bot» - system, що складається з 10 однакових літаючих drones

У момент часу t_0 drones мають початкові координати:

$$[x_1(t_0), y_1(t_0), z_1(t_0)]. \quad (2.11)$$

Положення drone, як твердого тіла в просторі визначається 6 параметрами:

- три кути;
- три координати центру мас.

Управління траєкторією руху drone здійснюється чотирма параметрами:

$$[r_T(t), V_T(t)] = [x_T(t), y_T(t), z_T(t), \psi_T(t)]. \quad (2.12)$$

де r_T – задана траєкторія руху drone;

V_T – лінійна швидкість;

x_T, y_T, z_T – координати, що позначають положення drone;

ψ_T – кут повороту щодо вертикальної осі (кут нишпорення).

Кути тангажу і крену впливають на горизонтальне прискорення drone і будуть розраховуватися в залежності від заданої траєкторії руху r_T .

Принцип польоту drone, горизонтальне прискорення drone залежить від горизонтальних складових рівнодіючої підйомної сили, відповідно, від нахилу та величини підйомної сили u_T , яка, до того ж, регулює вертикальне прискорення drone.

Кожен drone отримує інформацію про положення інших drone, що знаходяться у його зоні чутності. На основі цього drone регулює швидкість руху відповідно до модифікованого алгоритму Рейнольдса. Ця модель управління drones за швидкістю продемонструвала свою працездатність при комп'ютерному моделюванні.

Розробка децентралізованого способу управління проводиться з дотриманням вимог, сформульованих на початку цього розділу, і без прив'язки до конкретного завдання, а з метою застосування у різноманітності завдань, які можуть бути поставлені перед групою автономних drones, що входять до складу однієї «Swarm-bot» - system.

Для постановки завдань перед групою drones введено роль оператора, який в залежності від конкретної ситуації приймає оперативні рішення:

- щодо вибору лідера;
- траєкторії руху лідера та параметрів руху групи drones;
- режиму польоту;
- форми строю.

Іноді на практиці може знадобитися оперативне коригування траєкторії руху групи drones, що може бути досягнуто перемиканням режиму управління рухом лідера на управління по швидкості. Надалі розроблений спосіб управління був застосований у практичній задачі з картування сільськогосподарських площ у групі автономних drones.

Оператор вибирає режим поведінки drone: при $h = 1$ включається режим лідера, тоді управління по швидкості або траєкторії проводиться оператором; при $h = 0$ включається режим веденого, тоді drone стає повністю автономним і регулює свій рух відповідно до модифікованих правил Рейнольдса, довікляям і режимом руху групи.

Оператор також може призначати:

- режим польоту групи γ – («строевим порядком» або «Swarm»);
- тип строю f – (клин, колона, коло, ін.).

При виконанні імітаційного моделювання способу управління тривимірною «Swarm-bot» - system, що складається з автономних drones, у тому числі в задачі картування с/г площ наведено у третьому розділі та демонструють працездатність досліджуваної моделі, а також відповідність критеріям якісного групового руху drones.

Ключовим моментом під час виконання імітаційного моделювання є модифікація алгоритму К. Рейнольдса для можливості групового руху drones за параметром (γ) строем та зміни орієнтації геометричної структури «Swarm-bot» - system щодо напрямку руху.

Дослідження можливості застосування досліджуваної математичної

моделі управління колективним рухом drones, які входять до складу однієї «Swarm-bot» - system за допомогою модефікованого алгоритму К. Рейнольдса проводиться у середовищі MATLAB, що зумовлено його функціональністю. Досліджується можливість групового руху drones за параметром (γ) в режимі – «строевий порядок».

З ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДОСЛІДЖЕНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ DRONES, ЩО ВХОДЯТЬ У СКЛАД ОДНІЄЇ «SWARM-BOT» - SYSTEM

Експериментальні дослідження методів кінематичного та динамічного управління drones в одній «Swarm-bot» - system проводилися при різних штатних режимах групового руху на площині. Розглянемо спочатку приклад кінематичного управління в режимі стройового руху групи з 6 drones у формації «клин», коли лідеру задана плоска синусоїдальна траєкторія:

$$\begin{cases} y_L = 3\sin(1.5t) \\ x_L = 4t \end{cases}, \quad (3.1)$$

Розташування drones у системі координат лідера у формації «клин» було наступним:

$$D_L = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{16} \\ y_{11} & y_{12} & \dots & y_{16} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 & -2 & -2 & -2 \\ 0 & -1 & -2 & -2 & 0 & 2 \end{bmatrix}^T. \quad (3.2)$$

де x_{1i} та y_{1i} – координати i -го drone в системі координат лідера.

Для кожного drone були задані параметри строю (розташування сусідніх drone) у власній системі координат. Таким чином, при стройовому русі кожен drone, отримуючи інформацію про поточне розташування сусідніх drone, регулював швидкість руху згідно з правилами:

- «згуртованість»;
- «розділення»;
- «вирівнювання швидкостей» для уникнення зіткнення.

Ведені drones в експериментах розраховували помилку позиції в групі відносно лідера. Результати імітаційного моделювання представлені на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Фазова траєкторія стройового руху шести drones при кінематичному керуванні

Чорним кольором на рисунку 3.1 представлена траєкторія лідера, сірим – траєкторія відомих drones, які успішно зберігають форму строю у процесі руху. Середнє відхилення положення drone у групі щодо лідера становить 0,2 м. Безпечна відстань між drones була дотримана.

Для плоскої динамічної задачі розглянемо приклад руху аналогічної групи із шести drones у формації «клин». Результати імітаційного моделювання представлені на рисунку 3.2. Управління лідером у прикладі здійснюється оператором за допомогою пульта керування. Чорним кольором на рисунку 3.2 представлена траєкторія лідера у формі «вісімки». У динамічній задачі середня помилка за становищем у групі очікувано вище. При проведенні експіременту були видні стрибки помилки по внутрішньогруповому положенню ведених drones.

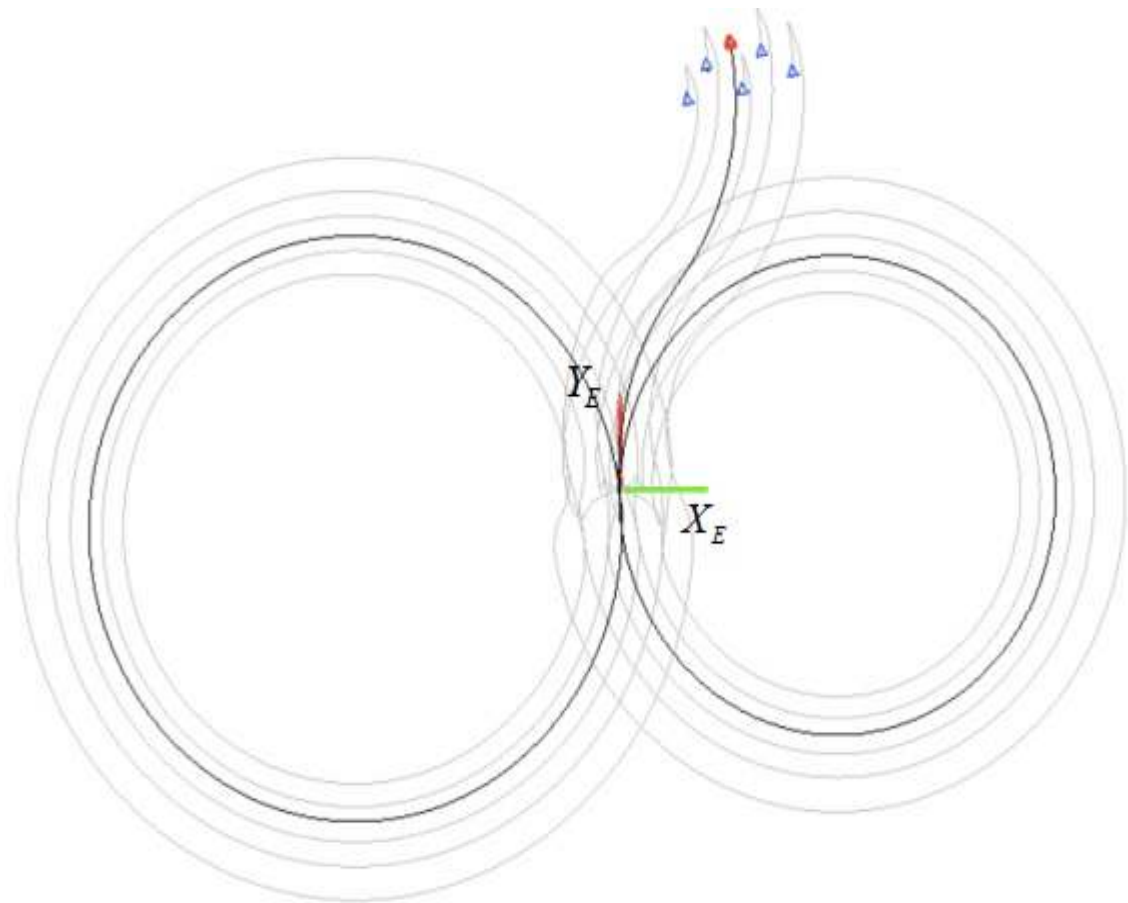


Рисунок 3.2 – Фазова траєкторія стройового руху шести drones з урахуванням їхньої динаміки

В перший раз – на 1-й секунді, коли оператор задав круговий рух лідеру, в другий раз – на 14-й секунді, коли оператор змінив напрямок кругового руху, і в кінці – з 26 по 30 секунду, коли оператор знову змінив напрямок руху лідера і різко зупинив. Критерій безпеки колективного руху також було дотримано.

В режимі «Swarm» - руху, коли кожен drone прагне до центру мас сусідніх drone, ризик зіткнення зростає. Тим не менш, керуючи лідером за швидкістю, спроба оператора зіткнутися з іншим drone не вдалася. У тривимірному просторі drones уникають зіткнення, переміщаючись також у вертикальній площині.

На рисунку 3.3 представлено відхилення drones від заданої позиції у строю. Можна помітити, що середньоарифметична відстань між drones

змінилася незначно порівняно з відхиленням drones від цільової позиції у строю.

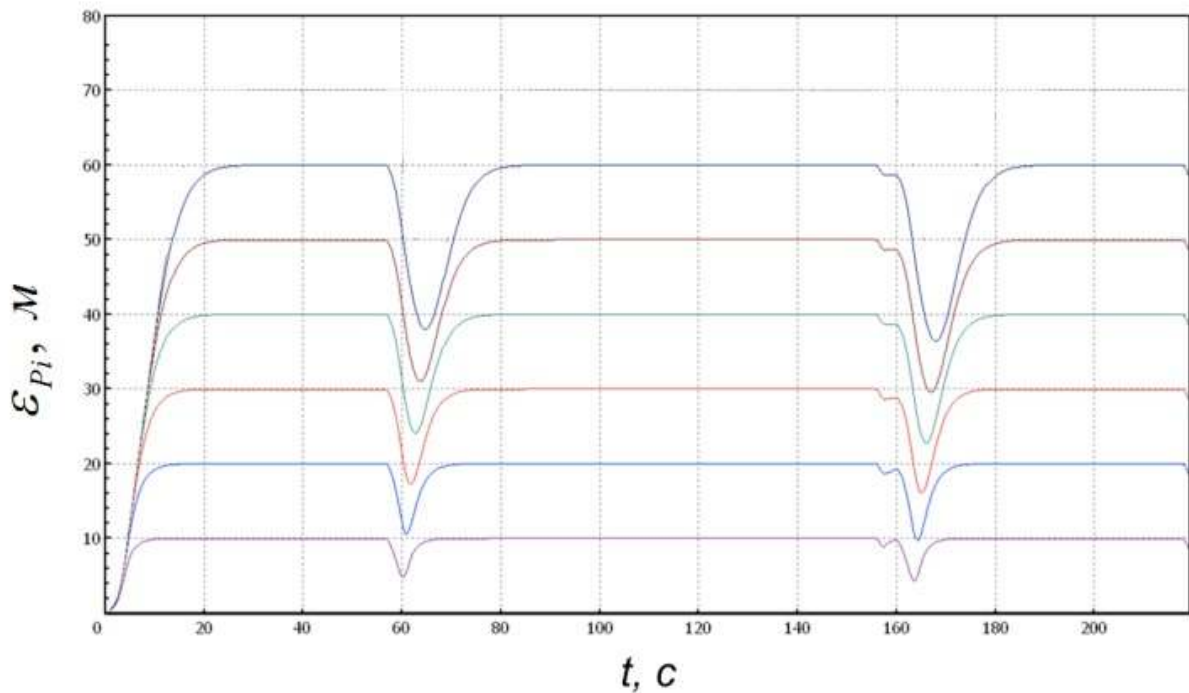


Рисунок 3.3 – Відхилення drones від заданої позиції у строю

Це пов'язано з тим, що d_{ij} розраховується як середня відстань до найближчого сусіда, яка при ланцюговій реакції групи змінюється незначно.

Наступним кроком на основі того ж прикладу за допомогою моделювання проаналізуємо вплив перешкод та шумів у датчиках положення на спосіб управління. Для оцінки впливу шумів на рух веденого дроне, призначимо одного ведучого дроне, відносно якого регулюється розташування для двох ведених drones з тією різницею, що 3-й дроне отримує координати ведучого дроне із зашумленням сигналу.

Застосуємо адитивний білий гауссів шум з математичним очікуванням рівним нулю і частотою в 2 Гц до всіх сигналів, що отримуються від сусідніх drones.

На прикладі 3-го drone можна помітити незначний вплив доданого шуму в координати лідера на помилки від цільового становища в строю. За результатами імітаційного моделювання групового руху drones при додаванні шумів у датчиках положення відповідно до похибки сучасних датчиків GPS, працездатність досліджуваної моделі децентралізованого керування drones збереглася.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи було досліджено математичну модель управління drones в одній "Swarm-bot" - system. Було досліджено низку вимог до способу управління drones в одній "Swarm-bot" - system та критеріїв для оцінки якості колективного руху drones, що базуються на принципах зграйної поведінки тварин.

За основи взято принципи управління Рейнольдса, та з метою забезпечення стройового руху модель доповнено правилом формації, що регулює груповий рух drones в одній "Swarm-bot" - system, за аналогією із системою матеріальних тіл, з'єднаних пружинами.

Модифікований алгоритм Рейнольдса використано для вирішення плоскої кінематичної задачі та плоскої динамічної задачі управління drones в одній "Swarm-bot" - system.

Досліджено модель системи управління drones в одній "Swarm-bot" - system та проведено комп'ютерну апробацію. У ході комп'ютерного моделювання було досліджено ряд штатних режимів групового руху drones в одній "Swarm-bot" - system. Експерименти продемонстрували працездатність математичної моделі управління drones в одній "Swarm-bot" - system та відповідність критеріям згуртованого та безпечного колективного руху при виконання різних траєкторій у групі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ткачов В.М., Токарєв 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. Токарєв, В.О. Радченко, В.О. Лебедев // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2017. №2(42). - С.154-157
2. 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. Токарєв - № u201704085; заявл. 24.04.2017; опубл. 28.08.2017. Бюл. № 16. 5с.
3. Радченко В.А., Токарєв В.В., Ткачев В.М. Мобільна система передачі даних на базі динамічно реконфігурованих мультикоптерних пристроїв / В.О. Радченко, В.В. Токарєв, В.М. Ткачов // Проблеми інформатизації: тези доповідей V - наук. - техн. конф., 13 - 15 лист. 2017р. - Харків, 2017. - С.36.
4. 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. И. Чурюмов. – Харків, 2017. – 116 с.
5. 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.
6. 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.

7. Серков О. А., Пустовойтов П. Є., Яковенко І. В., Лазуренко Б. О., Чурюмов Г. І., Токареєв 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. Токареєв, Ванг Наннан // Сучасні інформаційні системи. - 2019. - Т.3, №2. - С.22-27.

8. Серков О.А., Князев В.В., Лазуренко Б.О., Яковенко І.В., Чурюмов Г.І., Токареєв 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. Токареєв // 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.

9. Krivoulya G., Tokariiev V., Ilina 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. Ilina, 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.

10. Krivoulya G., Tokariiev V., Ilina I., Lebediev O., Shcherbak V. Algorithm of Iterations of Distribution of Subtasks Between «S-Bot» in One «Swarm-Bot» System // Proceedings of the 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems: (COLINS 2022). CEUR Workshop Proceedings., 12-13 may. 2022 y. - Gliwice, Poland. - P. 1531-1541.

11. Koshevoy N., Ilina I., Tokariiev V., Malkova A., Muratov V. Implementation Of The Gravity Search Method For Optimization By Cost Expenses Of Plans For Multifactorial Experiments // Radioelectronic and Computer Systems. – 2023. Vol. 1(105). - P. 23-32. Doi: 10.32620/reks.2023.1.02 (Scopus).

12. Кривуля Г.Ф., Токареєв В.В., Ільїна І.В., Кравець В.Є. Взаємодія між «s-bots» однієї «Swarm-bot» system у фізичному неорганізованому середовищі.

// Системи управління, навігації та зв'язку. - 2023. №1(71). - С.108-111. Doi: 10.26906/SUNZ.

13. Krivoulya G., Koshevoy N., Tokariiev V., Ilina I., Dubinsky D. Solving the Task of Topological Formation Intelligent Mobile «S-bots» for One «Swarm-bot» System // Proceedings of the 7th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems: (COLINS 2023). CEUR Workshop Proceedings., 20-21 april. 2023 y. - Kharkiv, Ukraine. - pp. 273-282.

14. Токареєв В.В., Швецов К.О. Математична модель управління «s-bots» в одній «Swarm-bot» - system / В.В.Токареєв, К.О. Швецов // Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: збірник тез доповідей, 20 вер. 2023р. - Тернопіль: 2023. - випуск 80. - С.90 - 91.