

## ДОДАТОК А

Графічний матеріал кваліфікаційної роботи

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Кафедра ЕОМ

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

Кваліфікаційна робота  
Другий (магістерський) рівень

**Автор:**

Швецов К.О.  
студ. гр. КСМм-21-1

**Керівник:**

Токарев В.В.  
доц. каф. ЕОМ

2024

## МЕТА І ЗАДАЧІ РОБОТИ

2

**МЕТОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ** є дослідження математичної моделі управління drones в одній "Swarm-bot" - system.

**ЗАВДАННЯ ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ МЕТИ:**

- ❖ провести огляд методів управління drones в одній "Swarm-bot" - system;
- ❖ провести імітаційне моделювання для визначення можливості застосування математичної моделі управління drones.

## АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

3

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.

## ОГЛЯД МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ DRONES В ОДНІЙ "SWARM-BOT" - SYSTEM

4

В даний час у drones набула широкого поширення платформа на багатороторній технології під назвою – квадрокоптер



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.

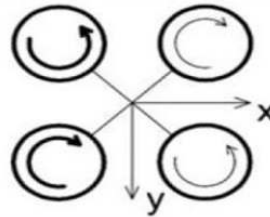
## ОГЛЯД МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ DRONES В ОДНІЙ "SWARM-BOT" - SYSTEM

5

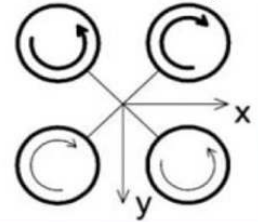
Приклад механічної складової базової платформи drone



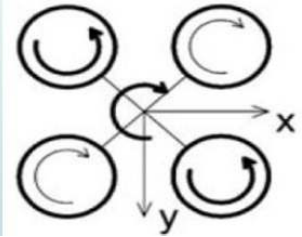
Принцип руху drone вправо



Принцип руху drone донизу



Приклад обертання drone навколо власної осі за годинниковою стрілкою



## ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ГРУПОЮ DRONES

6

«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.

## ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ГРУПОЮ DRONES

7

Ідеї **swarm - інтелекту** виходять із природи та біологічних систем, де багато прикладів зграйної поведінки тварин

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



Приклади роевої поведінки в природі. Ставриди, об'єдналися в тороподібну форму, збиваючи з пантелику хижаків



Приклади роевої поведінки у природі – міграція зграї птахів



## ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ГРУПОЮ DRONES

8

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.

## ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ УПРАВЛІННЯ ГРУПОЮ DRONES

9

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

- централізована стратегія;
- децентралізована стратегія;
- змішана стратегія.

У кваліфікаційній роботі досліджується децентралізована чи змішана стратегія групового управління drones. Таким чином, кожен автономний drone може передавати та приймати пакети даних:

- ідентифікатор drone;
- глобальне розташування drone;
- швидкість польоту drone;
- кут нищпорення drone.

## ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ В УПРАВЛІННІ DRONES В ОДНІЙ "SWARM-BOT" - SYSTEM

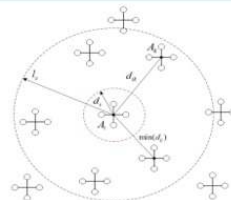
10

### Вимоги до алгоритму групового управління drones

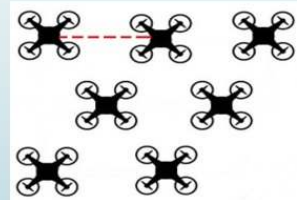
**Вимога № 1** – полягає в тому, що спосіб децентралізованого керування drone повинен відповідати шести критеріям:

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

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



Приклад дотримання критерію безпеки між довільною парою drones



## ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ В УПРАВЛІННІ DRONES В ОДНІЙ "SWARM-BOT" - SYSTEM

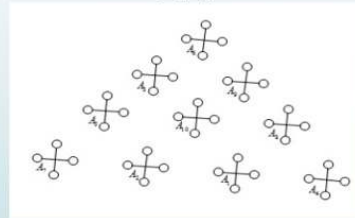
11

### Вимоги до алгоритму групового управління drones

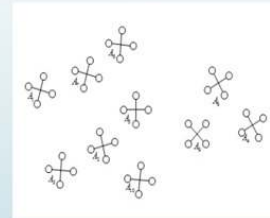
**Вимога № 2** – полягає в тому що «Swarm-bot» - system, що складається з drones, повинна бути здатна здійснювати груповий політ у тривимірному просторі у двох режимах:

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

Приклад режиму  
стройового польоту  
drones у формації «клин»



Приклад режиму  
«Swarm руху» польоту  
drones



**Вимога № 3** – є умовою змішаної стратегії управління групою drones.

## ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ В УПРАВЛІННІ DRONES В ОДНІЙ "SWARM-BOT" - SYSTEM

12

### Методи управління рухом drones в режимі «стресвий порядок» в одній «Swarm-bot» - system

**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 строєм, за умови, що система обмежень є здійсненною.

**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.

**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.

## ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ В УПРАВЛІННІ DRONES В ОДНІЙ "SWARM-BOT" - SYSTEM

13

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

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;

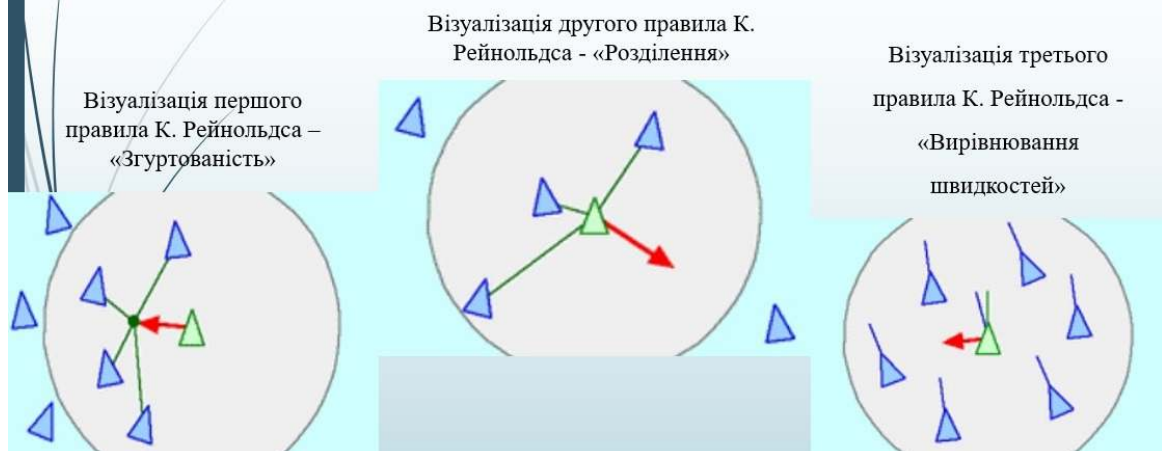
-правило № 2 – «Розділення» – полягає в тому, що drones в одній «Swarm-bot» - system прагнуть розійтися і зберегти безпечну відстань один від одного;

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

## ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ В УПРАВЛІННІ DRONES В ОДНІЙ "SWARM-BOT" - SYSTEM

14

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

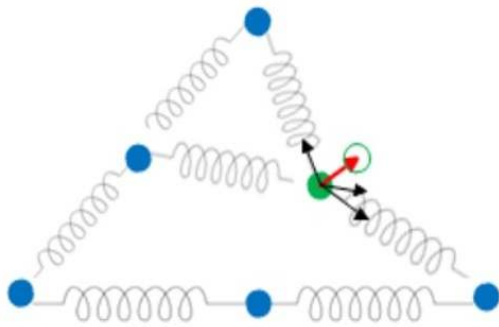


## ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ В УПРАВЛІННІ DRONES В ОДНІЙ "SWARM-BOT" - SYSTEM

15

### Модифікація алгоритму Крейга Рейнольдса

Приклад методу потенційних функцій



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, додаймо четверте правило «Формація» 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 її у вихідну позицію, зберігаючи геометричну топологію. Четверте правило замінює правило «Згуртованості» при режимі польоту строем, правило «Вирівнювання швидкостей» надасть демпфуючу дію, що дозволить виключити автоколивання системи.

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

16

Дослідження можливості застосування досліджуваної математичної моделі управління колективним рухом drones, які входять до складу однієї «Swarm-bot» - system за допомогою модифікованого алгоритму К. Рейнольдса проводиться у середовищі MATLAB, що зумовлено його функціональністю.

Досліджується можливість групового руху drones за параметром ( $\gamma$ ) в режимі – «строевий порядок».

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДОСЛІДЖЕНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ DRONES, ЩО ВХОДЯТЬ У СКЛАД ОДНІЄЇ «SWARM-BOT» - SYSTEM <sup>17</sup>

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:

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

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

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

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДОСЛІДЖЕНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ DRONES, ЩО ВХОДЯТЬ У СКЛАД ОДНІЄЇ «SWARM-BOT» - SYSTEM <sup>18</sup>

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:

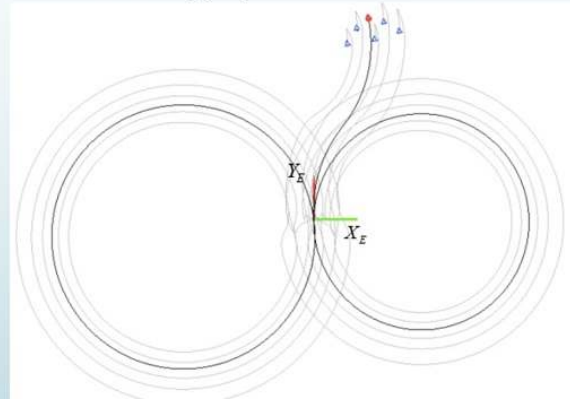
- «згуртованість»;
- «розділення»;
- «вирівнювання швидкостей» для уникнення зіткнення.

## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДОСЛІДЖЕНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ DRONES, ЩО ВХОДЯТЬ У СКЛАД ОДНІЄЇ «SWARM-BOT» - SYSTEM 19

Фазова траєкторія стройового руху шести drones при кінематичному керуванні

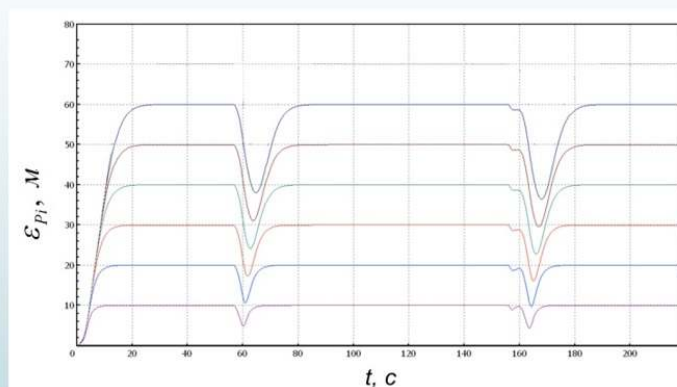


Фазова траєкторія стройового руху шести drones з урахуванням їхньої динаміки



## ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДОСЛІДЖЕНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ DRONES, ЩО ВХОДЯТЬ У СКЛАД ОДНІЄЇ «SWARM-BOT» - SYSTEM 20

Відхилення drones від заданої позиції у строю



## АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

21



*Титаренко Володимир Володимирович, кандидат технічних наук,  
доцент, Харківський національний  
університет радіоелектроніки, м. Харків  
ORCID: 0009-0002-7143-6163*

*Штефанія Євгенія Олександрівна,  
магістр, Харківський національний  
університет радіоелектроніки, м. Харків*

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ «S-BOTS» В ОДНІЙ «SWARM-BOT»-SYSTEM

Інтернет-адреса публікації на сайті:  
<http://www.konferenciaonline.org.ua/article664.1267>

Останнім часом для «S-bots» - систем стали з'являтися терміни «множинна» «S-bots» застосовувати термін «грама» «S-bots», яка є виконавцем багатоглибини алгоритму localization and mapping. Грама «S-bots» - набір автономних мобільних «S-bots», що входять до складу однієї «S-bots» - системи і мають первинне технічне оснащення для спостереження навколишнього середовища в обмеженій оклиці, що не мають ієрархії та обмінюються інформацією один з одним для спільної розвідки фізичного неорганізованого середовища рис.1.

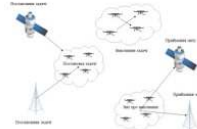


Рис.1. Приклад архітектури «децентралізованого управління» із застосуванням терміну «грама» «S-bots»

З цього випливає, що кожен «S-bots» в грі виконує одну й ті ж функції. Іншими словами, у грі відсутня вертикальна ієрархія, у тому числі відсутній головний «S-bots», відсутність якого може спричинити зупинку роботи всієї «S-bots» - системи. Кожний «S-bots» у грі самостійно визначає, коли необхідно почати обмін інформацією з іншими «S-bots». Звичайно, підстави для прийняття такого рішення у всіх членів у грі однакові.

90

## ВИСНОВКИ

22

**ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ була досліджена математична модель управління drones в одній "Swarm-bot" - system.**

### **В КВАЛІФІКАЦІЙНІЙ РОБОТІ ВИРІШЕНІ ТАКІ ЗАДАЧІ:**

- ❖ проведено огляд методів управління drones в одній "Swarm-bot" - system;
- ❖ проведено імітаційне моделювання для визначення можливості застосування математичної моделі управління drones.