

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОЗУБ АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 004.942:629.7.014-519(043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДОЛОГІЯ СИНТЕЗУ УПРАВЛІННЯ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЮ
СИСТЕМОЮ АВТОНОМНИХ ПОВІТРЯНИХ ОБ’ЄКТІВ**

Спеціальність 05.22.13 – навігація і управління рухом

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А.М. Козуб

Науковий консультант:
Робота виконана без
консультування.

Київ–2026

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	7
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	34
ВСТУП.....	35
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАНЬ ГРУПОВОГО УПРАВЛІННЯ.....	48
1.1. Типові завдання групового управління	48
1.2. Планування групових дій БПЛА в просторі.....	56
1.3. Проблемні питання організації управління груповим польотом БПЛА	61
1.4. Необхідність застосування функціонально стійкого управління груповим польотом БПЛА	69
1.5. Постановка проблеми дослідження.....	72
Висновки до розділу 1	76
Список використаних джерел до розділу 1	77
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ.....	87
2.1. Квадрокоптерна модель БПЛА	88
2.2. Стабілізація просторового положення квадрантора методом бекстепінгу... ..	102
2.3. БПЛА літакового типу	117
2.4. Система управління рухом крену	127
2.5. ПІД регулятор в системі управління БПЛА	130
2.6. Синтез системи стабілізації руху БПЛА на програмних траєкторіях	147
2.7. Синтез адаптивної системи управління об'єктом за умов невизначеності	150
2.8. Синтез адаптивної системи термінального управління	154
2.8.1. Способи та методи розв'язання проблеми підвищення динамічних характеристик	156
2.8.2. Критерії якості моделі	158
Висновки до розділу 2	159
Список використаних джерел до розділу 2.....	161
РОЗДІЛ 3. МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РУХОМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА БАЗІ НЕЙРОКОНТРОЛЕРА.....	173

3.1. Постановка завдання на управління групи із застосуванням нейромережі	174
3.2. Структура системи управління з нейроконтролером	196
3.3. Алгоритм налаштування вагових коефіцієнтів нейроконтролера під час управління динамічними об'єктами.....	197
3.3.1. Постановка проблеми	199
3.3.2. Формулювання завдання управління	186
3.3.3. Моделювання алгоритму управління.....	187
3.3.4. Реалізація системи управління.....	191
3.3.5. Дослідження основних властивостей алгоритму.....	192
3.4. Порядки дій під час групової побудови та планування маршруту безпілотних літальних апаратів	196
3.4.1. Постановка проблеми.....	196
3.5. Застосування інтерполяційних багаточленів для створення маршрутів БПЛА	197
3.5.1. Багаточлени Без'є.....	199
3.5.2. Алгоритм розрахунку кривої Без'є.....	202
Висновки до розділу 3	266
Список використаних джерел до розділу 3.....	206
РОЗДІЛ 4. МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ГРУПОВОГО ПОЛЬОТУ.....	212
4.1. Груповий політ з лідером	212
4.2. Протоколи консенсусу інформаційної системи на основі БПЛА в умовах перешкод.....	215
4.3. Поняття про потенціальні поля притягування-відштовхування. Груповий політ на основі створення потенціального поля	223
4.3.1. Контроль на прямій частині траєкторії.....	226
4.3.2. Рух на криволінійній частині траєкторії.....	228
4.3.3. Особливості руху в умовах перешкод.....	229
4.4. Груповий політ без лідера.	232
4.5. Груповий політ з віртуальним лідером	234

4.5.1. Постановка завдання.....	236
4.5.2. Побудова дерева рішень.....	238
4.5.3. Мультиагентні алгоритми.....	240
4.5.4. Реконфігурація мультиагентних систем в умовах завад.....	248
4.6. Показники якості шарів управління групою.....	262
Висновки до розділу 4.....	205
Список використаних джерел до розділу 4.....	267
РОЗДІЛ 5. ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ УПРАВЛІННЯ ГРУПОЮ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	275
5.1. Системи управління з кількома потоками інформації.....	275
5.1.1. Постановка проблеми.....	276
5.1.2. Схема зупинки і очікування.....	278
5.1.3. Схема ARQ.....	279
5.1.4. Результат моделювання.....	281
5.2. Оцінювання пропускнуої здатності групи БПЛА під час виконання завдання моніторингу.....	283
5.2.1. Постановка завдання.....	285
5.2.2. Розв'язання.....	286
5.2.3. Приклад виконання завдання.....	289
5.3. Оцінювання готовності оператора виконувати завдання управління безпілотними повітряними платформами.....	291
5.3.1. Особливості управління безпіотною платформою.....	295
5.3.2. Структура системи.....	295
5.3.3. Проблеми управління польотом.....	296
5.3.4. Дії оператора.....	296
5.3.5. Постановка проблеми.....	297
5.3.6. Техніка розв'язання.....	299
5.3.7. Критерії оцінювання оператора.....	299
5.3.8. Підхід до розрахунку.....	300
5.3.9. Моделювання.....	301

5.3.10. Числові приклади.....	303
Висновки до розділу 5	305
Список використаних джерел до розділу 5.....	306
РОЗДІЛ 6. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПОБУДОВИ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БЕЗПІЛОТНИХ АВАЦІЙНИХ ОБ’ЄКТІВ.....	313
6.1. Архітектура системи керування.	313
6.2. Ефективність групових польотів безпілотних літальних апаратів	315
6.2.1. Постановка завдання.....	317
6.2.2. Типові варіанти структур	318
6.2.3. Інформативність групи.	322
6.3. Застосування БПЛА в сільському (лісовому) господарстві	325
6.3.1. Технології виконання авіаційних робіт безпілотними літальними апаратами	325
6.3.2. Технологія інформаційної підтримки оперативних штабів з гасіння великих лісових пожеж, у тому числі в складних та надзвичайних умовах.....	329
6.3.3. Технологія інформаційної підтримки наземних сил із застосуванням БПЛА мікрокласа.	330
6.3.4. Технологія планового лісопатологічного моніторингу стану контрольних ділянок лісового фонду.....	330
6.3.5. Технологія протидії незаконній господарській діяльності в лісах під час патрулювання лісового фонду	331
6.4. Методика обґрунтування комплексу засобів моніторингу лісових пожеж.....	334
6.4.1. Постановка проблеми	334
6.4.2. Етапи виконання досліджень	335
Висновки до розділу 6	342
Список використаних джерел до розділу 6.....	343
ВИСНОВКИ.....	347
Додаток А. Список опублікованих автором праць за темою дисертації.....	352
Додаток Б. Акти впровадження	361

Додаток В. Блок-схема алгоритму моделі БПЛА	371
Додаток Г. Доказ теореми	374
Додаток Д. Програмний комплекс розробки маршруту і польотних завдань моніторингу.....	376
Додаток Е. Моніторинг пожеж та вирубки лісу.....	393
Додаток Є. Структурна схема методики обґрунтування комплекту засобів ОЕСп для моніторингу стану лісових пожеж.....	398
Додаток Ж. Патент на корисну модель.....	400

АНОТАЦІЯ

Козуб А. М. Методологія синтезу управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – навігація і управління рухом. Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, 2026.

Об'єктом дослідження є процес управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів.

Предметом дослідження є науково-методологічний апарат теорії управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів за комплексного підходу, який містить БПЛА, групу БПЛА та оператора.

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми дисертаційного дослідження, її сутність та сучасний стан, відбито зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету та завдання досліджень, визначено основні положення, що виносяться на захист, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані щодо публікацій та апробації результатів, подано відомості про їх впровадження.

У першому розділі проаналізовано стан питань групового управління, обґрунтовано важливість та актуальність, виокремлено наукові завдання, які потрібно виконати, сформульовано напрями та шляхи їх вирішення.

Проблемними питаннями, які природно виникають під час виконання зазначеного завдання, є управління окремим БПЛА, управління групою БПЛА, гарантування безпечних дій агентів групи і спроможність оператора адекватно діяти відповідно до ситуації, яка склалася під час виконання завдання за призначенням.

Одним із підходів, що може бути застосований під час виконання такого складного організаційно-технічного завдання, є побудова системи, що розглядається, як функціонально стійка, що дасть змогу розв'язати зазначені проблеми.

Під функціональною стійкістю розглянутої організаційно-технічної системи розумітимемо її властивість зберігати протягом заданого часу виконання своїх основних функцій у межах, установлених нормативними вимогами. Особливо важливим є управління в умовах змін властивостей об'єкта керування або системи управління, що здійснюється в реальному масштабі часу, в експлуатаційних режимах об'єкта керування.

До властивостей функціональної стійкості групи належать: надійність керування, структурна компактність, ступінь централізованості та живучість групи, стабілізація взаємного положення безпілотних апаратів у групі, надійність реконфігурації та топології групи, надійність пропускної здатності каналу керування.

Отже, науково-технічна проблема, яка розглядається в дослідженні, полягає у відсутності методологічного та методичного апаратів забезпечення рішення задач побудови функціонально стійких систем групового управління БПЛА, які б задовольняли вимоги сучасності і перспективи розвитку сучасної практики групового управління БПС для забезпечення виконання завдань за призначенням, є актуальною.

У другому розділі подано розроблені математичні моделі безпілотних літальних апаратів та розглянуто особливості визначення їх параметрів, проведено дослідження проблеми синтезу закону оптимального керування часом з використанням динамічної моделі БПЛА як літакового [5–7], так квадаторного типу [8], що являє собою систему диференціальних рівнянь з повністю відомими параметрами за відсутності шуму в каналах вимірювання контрольованих координат у площині тангажа та крену. Мета дослідження – синтезувати закон управління, який забезпечує переміщення квадатора з однієї точки в іншу в 3D просторі.

У роботі запропоновано алгоритм управління обмеженою групою літальних апаратів під час виконання завдання просторового перекриття території заданої площі. Розглянута проблема управління колективною поведінкою безпілотних літальних апаратів є найцікавішим питанням на сучасному етапі, що інтенсивно

розвивається – це управління групою мобільних роботів. Зазначений алгоритм ґрунтується, з одного боку, на сформованих поглядах про завдання управління літальними апаратами, а з іншого, передбачає врахування можливих особливостей керованої колективної поведінки, формування і використання колективного розуму для досягнення кінцевої мети. Характерною особливістю запропонованого алгоритму є виконання завдання зважаючи на зазначений критерій – ступінь виконання завдання.

У третьому розділі репрезентовано узагальнений підхід до опису математичної моделі безпілотного літального апарата, показано особливості реалізації системи управління рухом на базі нейроконтролера типу «Adaline» Б. Уїдроу та розглянуто особливості побудови маршруту БПЛА на основі обмеженої кількості точок з використанням кривих Без'є. Мета дослідження – вивчення руху БПЛА за маршрутом з нейроконтролерним керуванням.

Запропонований алгоритм розрахунку кривої може бути прототипом алгоритмів, що використовуються для завдання маршрутів БПЛА. Подальші дослідження передбачається спрямувати на розроблення конкретних алгоритмів завдання маршрутів.

Також розглянуто завдання вибору маршруту за колективного використання БПЛА, а також наведено порівняльний аналіз алгоритмів, заснованих на різних системах знань, а саме алгоритмів, що застосовуються в мультиагентних системах і алгоритмах пошуку на графах. Серед мультиагентних – розглянуті «мурашиний» алгоритм і алгоритм «запит-відповідь-угода». Альтернативою мультиагентним системам є також виконання цього завдання детермінованим алгоритмом, що використовує підхід пошуку розв'язку на графі, що має чудові властивості збіжності та точності у визначенні результату.

Найкращого виконання завдання вибору маршруту в системах високої розмірності слід очікувати в комбінуванні розглянутих алгоритмів, коли недоліки тривалістю пошуку і точності мультиагентних підходів компенсуватимуться збіжністю і точністю графових алгоритмів пошуку розв'язків, що дасть змогу

реалізувати тріаду «інтелект-адаптація-управління» в досягненні властивості емерджентності розроблюваних систем.

У четвертому розділі розглянуто методологічні основи моделювання групового польоту, що передбачають: визначення основної конфігурації групи, яка містить лідера, вимоги до дій групою БПЛА; зосередження на проблемі консенсусу до дій у групі; визначення сигналів управління, які дають змогу формувати функціонально стійке управління завдяки діям в створюваному сигналами управління потенціальному полі сил тяжіння та відштовхування, також запропоновано шарову структуру побудови системи управління.

За результатами наявних підходів до дій у групі, основну увагу зосереджено на безпілотних засобах, з огляду на напрацювання і положення для пілотованих засобів. Під час розгляду пілотованих засобів головний акцент зроблено на основних показниках безпечної дії, а саме інтервалах та дистанціях, які можна використати в безпілотних засобах.

У процесі управління безпілотними засобами виявлено такі способи організації дій у групі, які визначаються наявністю або відсутністю лідера, а саме: з лідером, без лідера. Організація дій групи БПЛА без лідера на перший погляд виглядає більш привабливішою завдяки виконанню великої кількості завдань, які визначаються окремим літальним засобом, безпека дій у групі гарантується рознесенням маршрутів у просторі та за часом. Але в цьому разі вимагається велика кількість часу на визначення окремого маршруту та контролю якості дій кожного літального засобу. Водночас кожний засіб має обмежені можливості, діє тільки самостійно, ймовірність загального виконання окремого завдання може виявитися не високою.

Для підвищення ймовірності виконання завдання бажано створювати групу, в якій є лідер. Усі члени групи виконують тільки одне завдання із забезпеченням визначених інтервалів та дистанцій. Але лідер стає вразливим елементом групи, у разі втрати лідера група дезорієнтована, вимагається деякий час для визначення лідера. Виявлена проблема може бути розв'язана, якщо група має віртуального лідера. Як віртуальний лідер може бути вибрано певну точку маршруту, наприклад,

кінцеву. Отже, в дослідженні на підставі наведених чинників обрано конфігурацію групи з лідером.

У п'ятому розділі подано обґрунтування схеми оброблення пакетів під час передавання інформації оператору і основні вимоги до оператора з розробленим оцінюванням його діяльності на основі методу аналізу ієрархій зважаючи на суперечливі чинники.

Під час управління діями групи БПЛА необхідно передавати великі обсяги інформації на наземну станцію управління.

Інформація передається пакетом, що спрощує оброблення інформації. Рух літака, збій обладнання, перешкоди на шляху поширення радіохвиль, деякі пакети даних можуть бути втрачені або, наприклад, може бути відсутнє підтвердження їх отримання.

Режим зупинки та очікування для повторних пакетів оцінюється як неефективний спосіб відновлення втрачених пакетів. У цьому разі канал зупиняється на тривалий час до отримання серії пакетів. Перспективнішим є використання вікна, яке ковзає у потоці інформації. Якщо повторити втрачену інформацію у фіксованому вікні, можна покращити використання радіоканалу. На практиці режим вибіркової відмови також дає аналогію використання каналу [20]. Проблема, яка досліджується в цій роботі, полягає в порівнянні зазначених технологій з погляду переваги та отримання оцінок розміру розсувного вікна.

У шостому розділі наведено пропозиції до реалізації багатопозиційної системи управління групою БПЛА на основі трирівневої архітектури, надано пропозиції з реалізації окремих елементів системи та виконання багатопозиційною системою безпілотних авіаційних об'єктів завдань за призначенням.

Архітектура системи керування побудована на основі поведінкових реакцій (Behavior-Based Architecture), яка має подання структури керувального алгоритму багатоканальної системи керування у вигляді сукупності щодо простих і за можливістю мінімально зв'язаних один з одним обчислювальних модулів, які формують поведінкові реакції за допомогою систем керування високого

середнього та низького рівнів. Кожна поведінкова реакція відповідальна за виконання конкретного управлінського завдання.

Основою функціонування системи є розроблений узагальнений показник продуктивності оператора, який є лінійною функцією часткових різнорідних критеріїв якості з невідомими ваговими коефіцієнтами, який може бути використаний під час сертифікації оператора після проходження процесу навчання.

Нижній рівень системи управління ґрунтується на виконанні завдань стабілізації керування квадрокоптером, який має нелінійну динаміку. Система управління рухом БПЛА має бути побудованою на базі двоканальної системи керування, у якій грубий канал швидкий, а точний використовує ПД-контролери з можливістю градієнтного налаштування параметрів. Для її реалізації доцільно використовувати мікроконтролери на платформі OrangePy.

Для гарантування безпечної дії групи пропонується використовувати протоколи управління, що базуються на консенсусі з використанням двох спеціальних сигналів, які є похідними від потенціальних енергій притягання агентів і їх відштовхування від сусідів і перешкод, що також гарантує цілісність групи.

Інформаційний обмін між БПЛА слід здійснювати в пакетному режимі з використанням механізму адаптованого передавання даних, заснованому на механізмі ARQ. Зазначені моделі побудови маршруту з оцінюванням дій оператора доцільно використовувати в середовищах MissionPlanner, ArduPilot.

Отже, у пропонованому дисертаційному дослідженні розроблено теоретичні засади побудови групового управління БПЛА та викладено нові методи управління окремим апаратом, групою, оцінювання оператора та формування інтегрального алгоритму покращення виконання завдання моніторингу земної поверхні.

Гіпотезою наукової проблеми є синтез оптимального управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів за суперечливих вимог, що досягається застосуванням методів та моделей, які створюють функціонально стійке управління, стабілізацію взаємного положення безпілотних

апаратів у групі, потрібну реконфігурацію та топологію групи, а також потрібну пропускну здатність каналу передавання даних.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Уперше запропоновано метод управління рухом мультиагентної системи, агентом якої є БПЛА, обладнаний засобами вимірювання та управління, який на відміну від наявних містить не тільки похибку відхилення групи від заданого маршруту, а й ще два спеціальні сигнали, які є похідними від потенціальних енергій притягання агентів і їх відштовхування від сусідів і перешкод, що гарантує цілісність і безпеку в процесі руху. Закон керування передбачає також зміну конфігурації групи під час долаття перешкод, за яким цілісність і розмір групової структури не втрачаються, що дає змогу виконувати завдання групової поведінки та навігації в динамічному середовищі.

2. Уперше розроблено метод управління БПЛА квадаторного типу завдяки введенню гібридної адаптивної системи керування для забезпечення точного відтворення бокового руху апарата, який на відміну від відомих містить різні закони управління, утім грубий канал забезпечує мінімізацію помилки відхилення від заданої траєкторії за мінімальним часом керування, що дає змогу швидко переміщати фазові координати об'єкта управління в область досяжності точнішого каналу, який функціонує за пропорційним законом керування.

3. Уперше запропоновано метод налаштування пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД)-контролерів градієнтного типу за умов апріорної невизначеності параметрів математичної моделі з адаптивним кроком налаштування, у якому на відміну від наявних локальні мінімуми вилучаються оптимізацією кроку зміни шуканих параметрів з використанням множників Лагранжа, що дає можливість отримати обчислювальну простоту, швидкість збіжності, можливість онлайн-налаштування в реальному масштабі часу.

4. Удосконалено метод формування маршруту БПЛА на основі кривих Без'є, який відрізняється від наявних мінімальною кількістю маршрутних точок, що забезпечує гладкість траєкторії та прийнятні значення кривизни при збереженні властивості інваріантності до масштабування.

5. Набув подальшого розвитку метод оброблення інформації під час керування БПС для забезпечення надійного двостороннього передавання інформації між бортовим комп'ютером БПС і оператором, який відрізняється від наявних оцінюванням каналу завантаження для встановлених методів керування потоком. Керування потоками має відбуватися за схемою ARQ, яка надає можливість селективного вибору та максимальної пропускної здатності приймальному каналу.

6. Удосконалено багаторівневу структуру багатопозиційної системи автономних повітряних об'єктів завдяки поєднанню різних схем адресації, що забезпечує ефективну взаємодію агентів у мультиагентній системі, яка дає змогу підвищити точність та оперативність виконання завдань такою системою, а також адаптивно змінювати конфігурацію рою завдяки введенню механізму консенсусу.

7. Набула подальшого вдосконалення побудована система групового управління БПЛА, що приводить до підвищення ефективності використання БПЛА, яка відрізняється функціональною стійкістю управління під час виконання типових завдань, що дає змогу коригувати план та оптимізацію маршруту польоту, ґрунтуючись на вже отриманих даних з інших БПЛА; збільшення вірогідності успішності виконання завдання; значний виграш у часі; можливість одночасного обстеження території та збільшення площі одночасного моніторингу; можливість постановки різних завдань для багатокомпонентних учасників групи БПЛА зважаючи на ефективність топології груп.

8. Зазнала подальшого розвитку методологія виконання моніторингу групою БПС в динамічному середовищі, яка відрізняється визначенням точного місцезнаходження групи БПЛА і ступенем виконання завдання на основі загальних даних групи та допомагає визначити кращий сценарій для кожного агента під час виконання завдання групою. Запропонована методологія може бути використана в народному господарстві у процесі виконання різних завдань, що допомагає під час виконання колективних дій багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів забезпечити прийняття рішення за мінімального часу.

Основні результати роботи реалізовані у: Центральному науково-дослідному інституті озброєння та військової техніки Збройних Сил України за замовленням Департаменту військово-технічної політики, розвитку озброєння та військової техніки Міністерства оборони України під час підготовки звітних матеріалів науково-дослідної роботи, шифр «Стратосфера-Р» (акт від 15.09.2016 р.); Науково-виробничій впроваджувальній фірмі «Геотехнологія», м. Київ (акт від 18.08.2022 р.); Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ під час підготовки звітних матеріалів за темою НДР «Розробка засобів інформаційно-аналітичної підтримки завдань забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури в регіональній соціоєкосистемі за умов зростання природних, техногенних і соціальних загроз» (№ ДР 0121U109216, акт від 10.09.2024 р.); навчальному процесі Національного університету «Київський авіаційний інститут» під час підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології» у дисциплінах «Мультиагентні системи управління» та «Інтелектуальні системи управління в авіації» (акт від 11.09.2024 р.); освітньому процесі Національної академії оборони України на кафедрі геопросторової підтримки та застосування космічних систем у навчальній дисципліні «Організація застосування спеціальних комплексів для виконання завдань розвідки» (акт від 07.10.2024 р.); ТОВ «Аерокосмічне агентство «Магеллан», м. Київ (акт № 1-02/25 від 10.01.2025 р.).

Практична значимість одержаних результатів. Запропоновані в дисертаційній роботі математичні моделі та методи дають змогу:

1) формалізувати процес застосування багатопозиційної системи автономних повітряних об'єктів для функціонально стійкого управління під час реалізації групового польоту БПЛА в умовах відмов інформаційного каналу;

2) забезпечити точне відтворення бокового руху апарата завдяки двоканальній системі керування БПЛА квадаторного типу;

3) здійснити налаштування ПІД-контролерів для керування рухом квадатора за умов апріорної невизначеності математичної моделі, квазіоптимальний режим роботи якого поступається оптимальному режиму лише

на 3 %, та підвищити швидкість налаштування параметрів ПД-контролерів, яка порівняно з вбудованим алгоритмом пакету Simulink швидше на 4 %;

4) розробити методи та моделі безпечної взаємодії на основі введення в закон керування ефекту «потенційного поля», яке реалізовує ідею притягування та відштовхування агентів групи;

5) підвищити ефективність застосування БПЛА завдяки спеціальній підготовці операторів, що спрямована на зменшення помилок під час виконання завдань за призначенням.

Надалі доцільно більш докладніше дослідити можливість застосування в рамках розроблених методик, нелінійних схем компромісного вибору варіантів комплектів засобів моніторингу в умовах широкого варіювання пріоритетів ОПР, зумовлених швидкими змінами оперативної обстановки (наприклад, у стані лісової пожежі).

Ключові слова: : система управління, багатопозиційна система, безпілотний літальний апарат, безпілотний авіаційний комплекс, безпілотне повітряне судно, дистанційно пілотована авіаційна система, управління груповим рухом, мультиагентна система, інтелектуальна система оброблення інформації, планування траєкторії, управління рухом, інформаційні технології.

Список публікацій здобувача

1. Замичковський В. П., Козуб А. М., Шолохов С. М. Напрями застосування БПЛА в інтересах Збройних Сил України з урахуванням тенденцій ведення війн 6-го та 7-го поколінь: Зб. наук. пр. Київ: ЦНДІ ЗСУ. 2011. Вип. № 2 (88). С. 45–55.

2. Зуйко В. В., Козуб А. М., Михалевич В. Е., Сучасний стан та тенденції розвитку космічних систем дистанційного зондування Землі провідних країн світу. Науково-технічний журнал Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України. 2015. №.2(6). С. 51–60.

3. Козуб А. М., Шумейко В. О., Зуйко В. В., Ніколаєнко О.Є. Аналіз досвіду використання космічних систем та безпілотних авіаційних комплексів в

сучасних локальних конфліктах та перспективи їх розвитку. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ: НУОУ. 2018. № 3(33). С. 53–60. DOI: 10.33099/2311-7249/2018-33-3-53-60.

4. Kuchеров D. P., Kozub A. M., Dzhafarzade R. M. *Bespilotnyie letatelnyie apparaty pri vyipolnenii kollektivnyih deystviy*. МАА. Elmi Məcmuələr. 2014. Cild 16. № 1. S. 1–8.

5. Kuchеров D. P., Kozub A. M. *Metodyi sinteza adaptivnyih sistem terminalnogo upravleniya*. Saarbrücken, Deutschland LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 325 p.

6. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Термінальне керування динамічною системою третього порядку в умовах обмежених збурень. Вісник інженерної академії України. 2013. № 3–4. С. 95–99.

7. Automated systems in the aviation and aerospace industries. Chapter 7. Synthesis of the Laws of Motion Control of a UAV Group With Natural Obstacles / Dmytro Kuchеров, Minglei Fu Zhejiang, Andrei Kozub. • copyright 2019 • 486 pp (193–219) • Identifiers: LCCN 2018036333| ISBN 9781522577096 (h/c) | ISBN 9781522577102. DOI: 10.4018/978-1-5225-7709-6.ch007 **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

8. Kuchеров D., Rasstrygin A., Sushchenko O., Zhdanov S., Kozub A. Synthesis of the switching control law for a quadrotor autopilot. *International Journal of Engineering & Technology* 7(4), 3065-3068, 2018, DOI: 10.14419/ijet.v7i4.16368 **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

9. Kuchеров Dmytro, Sushchenko Olga, Kozub Andrey, Petrov Anton. Assessment operator-pilot training in conflict situation. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019. Vol. 2588, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.55056/ceur-ws.org/Vol-2588/paper1.pdf> **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

10. Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A., Skrynkovsky R. Stabilizing the spatial position of a quadrotor by the backstepping procedure. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* Vol. 23, No. 2, August 2021, pp. 1188–

1199. ISSN:2502-4752. DOI:10.11591/ijeecs.v23.i2. pp. 1188-1199, **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

11. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Планування маршруту БПЛА. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2013. № 5(194). С. 189–192.

12. Кучеров Д. П., Голенківська Т. І., Жданов С. В., Рудаков В. І., Станіщук А. Б., Твердохлібов В. В., Козуб А. М. Спосіб формування маршруту безпілотного літального апарата: пат. на корисну модель 117211 зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 26.06.2017.

13. Кучеров Д. П., Козуб А. М., Костина О. М. Управління мультиагентною системою в потенціальному полі. Науково-технічний журнал Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України. 2017. № 2 (14). С. 55–61.

14. Kuchеров D., Kostyna O., Kozub A. Group of UAVs Moving on Smooth Control Law with Fixed Obstacles. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal Vol. 2, No. 3, 1034-1041 (2017), DOI: 10.25046/aj0203131 **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

15. Кучеров Д.П., Козуб А.М. Інтеграційний підхід до завдання вибору маршруту групи БПЛА. Штучний інтелект. № 4 (62). 2013. С. 333–343.

16. Кучеров Д. П., Козуб А. М., Голенковська Т. І. Реконфігурація мультиагентних систем в умовах завад. Наука і оборона. 2016. № 3. С. 52–58.

17. Дихтяренко В. Н., Кучеров Д. П., Козуб А. М. Алгоритм налаштування вагових коефіцієнтів нейроконтролера при керуванні динамічними об'єктами. Науковий вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2014. № 2(14Е). С. 27–35.

18. Бондарєв Д. І., Джафарзаде Р. М., Козуб А. М. Ефективність групових польотів безпілотних апаратів: Зб. наук. пр. «Системи обробки інформації» Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. 2014. Вип. 6(122). 206 с. С. 9–14.

19. Козуб А. М., Суворова Н. О. Аналіз засобів збору інформації для геоінформаційних систем. Системи озброєння і військова техніка. Харків: ХУПС. 2011. Вип. № 3 (27). С.42–47.
20. Козуб А. М., Суворова Н. О. Оптимізація комплекту засобів оптико-електронного спостереження аерокосмічного моніторингу лісових масивів. Авиационно-космическая техника и технология. Харків: ХАІ. 2012. Вип. № 3. С. 108–112.
21. Козуб А. М. Методика обґрунтування комплекту засобів моніторингу лісових пожеж. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2014. № 4(211). С. 194–199.
22. Козуб А. М., Білобородов О. О. Обґрунтування комплекту оптико-електронної апаратури аерокосмічних засобів моніторингу. Управління розвитком складних систем. Вип. 21. Київ: КНУБА. 2015. С. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2015.21>.
23. Козуб А. М. Оцінка бойових можливостей з радіоподавлення супутникового зв'язку з використанням БПЛА постановки перешкод в операціях. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ: НУОУ. 2014. № 3(21). С. 23–26. DOI: 10.33099/2311-7249/2014-0-3(21)-23-26.
24. Заклевський Д. Є., Зуйко В. В., Козуб А. М. Методика оцінювання стійкості структури системи супутникового зв'язку: Зб. наук. пр. «Системи управління, навігації та зв'язку». Київ: ЦНДІ Н і У. 2011. Вип. № 4 (20). С. 279–283.
25. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Оцінка пропускну здатності групи безпілотних літальних апаратів під час виконання завдання з моніторингу. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ: НУОУ. 2015. № 2 (23). С. 70–74. DOI: [https://doi.org/10.33099/2311-7249/2015-0-2\(23\)-70-74](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2015-0-2(23)-70-74).
26. Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A., Nakonechnyi V. Assessing the operator's readiness to perform tasks of controlling by the unmanned aerial platforms. Advances in Science, Technology and Engineering Systems, 2020, 5(4), pp. 457–462, <https://dx.doi.org/10.25046/aj050454> (проіндексовано в базі даних Scopus).

Список апробаций здобувача

1. Козуб А. М., Пронь С. В. Огляд стану ринку безпілотних засобів, які можуть бути задіяні для охорони об'єктів від пожеж. III Міжнар. наук-практ. конф. «Інформаційні технології, системний аналіз і моделювання соціоекологоекономічних систем». – Київ: НАУ. 19–21 жовтня 2011 р. С. 219–220.
2. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Математична модель колективного впорядкованого руху БПЛА. V Міжнар. наук-практ. конф. «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (ПРТК-2012). Київ: НАУ. 15–16 травня 2012 р. С. 66–68.
3. Kozub A. M., Suvorova N. O., Pron' S. V. Optimization of a set of surveillance means for ground aerospace monitoring in agriculture and forestry. V Всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації космічні технології». Київ: НАУ. 25–27 вересня 2012 р. С. 7.36–7.40.
4. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Моделювання поздовжнього руху в задачах групового керування безпілотними літальними апаратами. XIX Міжнар. конф. з автоматичного управління «Автоматика / AVTOMATICS – 2012». Київ: НУХТ. 2012. С. 322.
5. Kuchеров D., Kozub A. Path planning unmanned aerial vehicles in complex flight conditions. XI Міжнародна конференція доповідей «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)». 9–11 жовтня 2012 р. Вінниця: ВНТУ. 2012. С. 179.
6. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Мультиагентний підхід до задачі вибору маршруту: матеріали VI Міжнар. наук-практ. конф. «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2013)», 27–29 травня 2013 р. Київ: НАУ. 2013. С. 195–197.
7. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Алгоритм керування обмеженою групою БПЛА: матеріали XX Міжнар. конф. з автом. управ. «Автоматика / Automatics – 2013», 25–27 вересня 2013 р. Миколаїв: Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. 2013. С. 242–243.

8. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Інтеграційний підхід до завдання вибору маршруту групи БПЛА: матеріали Міжнар. наук. молод. школи «ССИИ–2013». 23–27 вересня 2013 р. сел. Кацивелі, АР Крим, Україна. Донецьк: Інститут проблем штучного інтелекту, 2013. С. 144–146.

9. Козуб А. М. Аерокосмічні засоби оптико-електронного моніторингу стану лісових пожеж: матеріали V Міжнар. наук-практ. конф. «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики». 5–8 травня 2014 р. Луганськ: Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2014. С. 134–136.

10. Козуб А. М. Використання методу організації колективного мультиагентного управління групою БПЛА для доставки вантажу: матеріали VII наук-техн. конф. «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення». 23–24 жовтня 2014 р. Київ: Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації державного університету телекомунікацій. 2014. С. 104–105.

11. Козуб А. М. Застосування групи БПЛА з використанням агентського підходу для вирішення завдання коригування вогню артилерії: матеріали науково-практичної конференції “Перспективи розвитку ракетних військ і артилерії Сухопутних військ”, 5–6 листопада 2014 р. Львів: Академія сухопутних військ імені Гетьмана Петра Сагайдачного. 2014. С. 73–76.

12. Козуб А. М. Агентний підхід щодо рішення завдання постановки перешкод станціям супутникового зв'язку з використанням БПЛА: матеріали XX Всеукр. наук-практ. конф. «Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнологічних систем спеціального призначення». 28 листопада 2014 р. Житомир: Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова. 2014. С. 152–153.

13. Кучеров Д. П., Козуб А. М., Іванов Б. П. Інформаційне забезпечення групового польоту БПЛА: матеріали наук-практ. конф. «Перспективи розвитку автоматизованих систем управління військами та геоінформаційних систем». 29 січня 2015 р. Львів: Академія сухопутних військ імені Гетьмана Петра Сагайдачного, 2015. С. 249–251.

14. Козуб А. М. Оцінка пропускної здатності групи безпілотних літальних апаратів при виконанні завдання моніторингу: матеріали наук-практ. конф. «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки та досвід її експлуатації в особливий період». 25 червня 2015 р. Київ: Державний науково-дослідний інститут авіації. 2015. С. 36.

15. Kuchеров D., Kozub A. Control System Objects with Multiple Streams of Information. Proceedings. 2015 IEEE 3rd International Conference “Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)”, October 13–15, 2015. P. 290–293. DOI: 10.1109/APUAVD.2015.7346623 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

16. Козуб А. М., Шумейко В. О. Роль космічних систем та безпілотних авіаційних комплексів в сучасних локальних конфліктах: матеріали міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 7 квітня 2016 р. Київ: НУОУ. 2016. С. 124–126.

17. Kuchеров D., Kozub A., Kostyna O. Group behavior of UAVs in obstacles presence. 2016 IEEE 4th International conference «Methods and systems of navigation and motion control»(MSNMC), October 18–20, Kiev Ukraine, p. 51–54. DOI: 10.1109/MSNMC.2016.7783104 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

18. Козуб А. М., Шумейко В. О., Кащишин О. Л. Методика планування застосування безпілотних авіаційних комплексів на основі результатів оброблення даних космічної розвідки: матеріали наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 5 квітня 2017 р. Київ: НУОУ. 2017. С. 116–119.

19. Варламов І. Д., Козуб А. М., Шумейко В. О. Аналіз технологій застосування Україною даних космічного і повітряного спостереження Збройними Силами України: матеріали наук-практ. конф. «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи». 4 жовтня 2017 р. Київ: Національний центр управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України. 2017. С. 84–86.

20. Kuchеров D., Kozub A. and Rasstrygin A., "Setting the PID Controller for Controlling Quadroter Flight: a Gradient Approach", 2018 IEEE 5th International

Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kiev, Ukraine, 2018, pp. 90–93. DOI: 10.1109/MSNMC.2018.8576294 **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

21. Kuchеров D., Kozub A. Model of UAV as agent of multiagent system. 2018 IEEE International Conference of Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT 2018), 2018, pp. 343–347. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409156. **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

22. Зуйко В. В., Козуб А. М., Павлунько М. Я. Взаємодія космічних систем та безпілотних авіаційних космічних систем для виконання завдань розвідки та ураження: зб. матер. IV Міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 10 квітня 2019 року. Київ: НУОУ. 2019. С. 54.

23. Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A. Operator Training for Unmanned Aerial Vehicles Control. 2019 IEEE 5th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development, APUAVD 2019. Proceedings, 2019, pp. 31–34, 8943918. DOI: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943918 **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

24. Kuchеров D., Kozub A. Backstepping Algorithm for Controlling of Quadrotor. 2020 IEEE 6th International conference “Methods and systems of navigation and motion control”(MSNMC), October 20–23, Kiev Ukraine, p. 51–55. DOI: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255518 **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

25. Kuchеров D., Kozub A., Tkachenko V., Rosinska G., Poshyvailo O. PID Controller Machine Learning Algorithm Applied to the Mathematical Model of Quadrotor Lateral Motion. 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development, APUAVD 2021. Proceedings, 2021, pp. 86–89. DOI:10.1109/APUAVD53804.2021.9615438 **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.

26. Козуб А. М., Шумейко В. О., Мосійчук Д. І. Взаємодія безпілотних авіаційних систем для виконання завдань спостереження та ураження: зб. матер. VI Міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в

інтересах національної безпеки та оборони». 23 травня 2023 року. Київ: НУОУ. 2023. С. 104–106.

27. Козуб А. М. Синтез системи прийняття рішень керування безпілотною системою в умовах невизначеності: зб. матер. VII Міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 24 квітня 2024 року. Київ: НУОУ. 2024. С. 159–161.

28. Козуб А. М. , Кучеров Д. П. , Пошивайло О. М. Рекомендаційна система для ефективного функціонування повітряного транспорту в складних умовах польоту: зб. тез доп. XV Міжнар. наук-практ. конф. «Комп'ютерні системи та мережні технології» (CSNT-2024). 25–26 квітня 2024 р. Київ: НАУ. 2024. С. 83–84.

29. Козуб А. М. Варіант побудови системи управління групових дій безпілотних літальних апаратів: зб. матер. VIII Міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 30 жовтня 2025 року. Київ: НУОУ. 2025. С.173–174.

30. Kuchеров D., Khalimon N., Tkachenko V., Myroshnychenko I., Kozub A. Determination of Coordinates of Airborne Objects From Signals of Ground Emitters. 2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, Ukraine, 2025, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSNMC61130.2025.11399688 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

31. Козуб А. М. Технології виконання авіаційних робіт безпілотними літальними апаратами: зб. матер. IX Міжнар. наук-практ. конф. «Нові горизонти в наукових дослідженнях: забезпечення військ (сил) та застосування геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 28 квітня 2026 року. Київ: НУОУ. 2026. С. 801–804.

ABSTRACT

Kozub A.M. Methodology of the synthesis of management of the multi-position system of autonomous air objects – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.22.13 – navigation and traffic control. National University "Kyiv Aviation University", Kyiv, 2026.

The object of research is the process of controlling a multi-position system of autonomous aerial objects.

The subject of the study is the scientific and methodological apparatus of the theory of control of a multi-position system of autonomous aerial objects using an integrated approach, which includes a UAV, a group of UAVs, and an operator.

The introduction substantiates the relevance of the problem of dissertation research, its essence and current state, reflects the connection of the work with scientific programs, plans, topics, formulates the goal and objectives of the research, determines the main provisions put forward for defense, the scientific novelty and practical significance of the results obtained, provides data on publications and testing of the results, and provides information on their implementation.

The first section analyzes the state of group management issues, substantiates their importance and relevance, identifies scientific problems to be solved, formulates directions and ways to solve them.

The problematic issues that naturally arise when solving the specified task are the control of a single UAV, the control of a group of UAVs, ensuring the safe actions of group agents, and the operator's ability to act adequately in accordance with the situation that has arisen when performing the assigned task.

One of the approaches that can be applied in solving such a complex organizational and technical problem is the construction of a system that is considered to be functionally stable, which will allow to ensure the implementation of the specified problems.

By the functional stability of the considered organizational and technical system we will understand its property to maintain for a given time the performance of its main functions within the limits established by regulatory requirements. Of particular importance is management in conditions of changes in the properties of the control object or control system, which is carried out in real time, in the operational modes of the control object.

The properties of the functional stability of the group include: control reliability, structural compactness, the degree of centralization and survivability of the group, stabilization of the mutual position of unmanned aerial vehicles in the group, reliability of reconfiguration and topology of the group, reliability of the bandwidth of the control channel.

Thus, the scientific and technical problem considered in the study is the lack of methodological and methodological apparatus for solving the problems of building functionally stable UAV group control systems that would meet the requirements of modernity and prospects, the development of modern practice of group control of UAVs to ensure the performance of tasks as intended is relevant.

The second section presents the developed mathematical models of unmanned aerial vehicles and considers the features of determining their parameters, and studies the problem of synthesizing the law of optimal time control using a dynamic model of both aircraft [5-7] and quadrotor type UAVs [8], which is a system of differential equations with completely known parameters in the absence of noise in the measurement channels of controlled coordinates in the pitch and roll planes. The purpose of the study is to synthesize a control law that ensures the movement of the quadrotor from one point to another in 3D space.

The paper proposes an algorithm for controlling a limited group of aircraft when performing the task of spatial overlap of a given area. The considered problem of controlling the collective behavior of unmanned aerial vehicles is the most interesting issue at the present stage, which is intensively developing - this is the control of a group of mobile robots. The algorithm proposed here is based on the one hand on the established views on the task of controlling aircraft, and on the other hand, it involves taking into

account possible features of controlled collective behavior, the formation and use of collective intelligence in the interests of the ultimate goal. A characteristic feature of the proposed algorithm is the performance of the task taking into account the proposed criterion - the degree of task performance.

The third section presents a generalized approach to describing the mathematical model of an unmanned aerial vehicle, shows the features of implementing a motion control system based on a neurocontroller of the “Adaline” type by B. Withrow, and considers the features of constructing a UAV route based on a limited number of points using Bezier curves. The purpose of the study is to study the movement of a UAV along a route with neurocontroller control.

The proposed algorithm for calculating the curve can be a prototype of algorithms used for setting UAV routes. Further research is planned to be directed to the development of specific algorithms for setting routes.

The task of choosing a route during collective use of UAVs is also considered, and a comparative analysis of algorithms based on different knowledge systems is also provided, namely algorithms used in multi-agent systems and graph search algorithms. Among multi-agent ones, the ant algorithm and the query-response-agreement algorithm are considered. As an alternative to multi-agent systems, a solution to this problem is also presented by a deterministic algorithm that uses the graph solution search approach, which has excellent properties of convergence and accuracy in determining the result.

The best solution to the route selection problem in high-dimensional systems should be expected in a combination of the considered algorithms, when the shortcomings in the search duration and accuracy of multi-agent approaches will be compensated by the convergence and accuracy of graph algorithms for finding solutions, which will allow implementing the triad of "intelligence-adaptation-control" in achieving the emergence property of the developed systems.

The fourth section considers the methodological foundations of group flight modeling, including: determining the basic configuration of the group, which includes the leader, requirements for actions by the UAV group, focusing on the problem of consensus for actions in the group, determining control signals that will allow for the

formation of functionally stable control due to actions in the potential field of gravitational and repulsive forces created by control signals, and a layered structure for building a control system is also proposed.

Based on the results of existing approaches to group actions, the main focus is on unmanned vehicles, taking into account developments and provisions for manned vehicles. When considering manned vehicles, the main focus is on the main indicators of safe action, namely the intervals and distances that can be used in unmanned vehicles.

When controlling unmanned aerial vehicles, the following methods of organizing actions in a group have been identified, which are determined by the presence or absence of a leader, namely: with a leader, without a leader. Organizing the actions of a group of UAVs without a leader at first glance looks more attractive due to the performance of a large number of tasks that are determined by a separate aircraft, the safety of actions in the group is ensured by the separation of routes in space and time. But in this case, a large amount of time is required to determine a separate route and control the quality of the actions of each aircraft. At the same time, each vehicle has limited capabilities, acts only independently, the probability of the general performance of a separate task may not be high.

To increase the probability of completing the task, it is desirable to create a group in which there is a leader. All members of the group perform only one task with the provision of certain intervals and distances. But the leader becomes a vulnerable element of the group, if the leader is lost, the group is disoriented, it takes some time to determine the leader. The identified problem can be solved if the group has a virtual leader. A certain point of the route, for example, the final one, can be chosen as a virtual leader. Thus, in the study, based on the above factors, a group configuration with a leader was selected.

The fifth section presents the justification of the packet processing scheme when transmitting information to the operator and the main requirements for the operator with the developed assessment of his activities based on the method of hierarchy analysis taking into account contradictory factors.

When managing the actions of a UAV group, it is necessary to transmit large amounts of information to the ground control station.

Information is transmitted in a packet, which simplifies information processing. Aircraft movement, equipment failure, obstacles to the propagation of radio waves, some data packets may be lost or, for example, there may be no confirmation of their receipt.

The stop-and-wait mode for repeated packets is considered to be an inefficient way to recover lost packets. In this case, the channel is stopped for a long time before receiving a series of packets. A more promising approach is to use a sliding window in the information flow. If we repeat the lost information in a fixed window, we can improve the utilization of the radio channel. In practice, the selective rejection mode also provides an analogy to channel utilization [20]. The problem investigated in this paper is to compare these technologies in terms of their advantages and to obtain estimates of the sliding window size.

The sixth section presents proposals for the implementation of a multi-position UAV group control system based on a three-level architecture, and provides proposals for the implementation of individual elements of the system.

The architecture of the control system is built on the basis of behavioral reactions (Behavior-Based Architecture), which has a representation of the structure of the control algorithm of a multi-channel control system in the form of a set of relatively simple and, if possible, minimally interconnected computational modules that form behavioral reactions using high-medium and low-level control systems. Each behavioral reaction is responsible for solving a specific management problem.

The basis of the system is the developed generalized operator performance indicator, which is a linear function of partial heterogeneous quality criteria with unknown weighting factors, which can be used for operator certification after completing the training process.

The lower level of the control system is based on solving the problem of stabilizing the control of a quadcopter, which has nonlinear dynamics. The UAV motion control system should be built on the basis of a two-channel control system, in which the coarse channel is fast, and the precise one uses PID controllers with the possibility of gradient parameter adjustment. For its implementation, it is advisable to use microcontrollers on the OrangePy platform.

To ensure safe operation of the group, it is proposed to use control protocols based on consensus using two special signals, which are derived from the potential energies of attraction of agents and their repulsion from neighbors and obstacles, which also guarantees the integrity of the group.

Information exchange between UAVs should be carried out in batch mode using the mechanism of adapted data transmission based on the ARQ mechanism. The proposed models of route construction with evaluation of operator actions are expedient to use in the MissionPlanner, ArduPilot environments.

Therefore, the presented dissertation research developed theoretical principles for building group control of UAVs and outlined new methods for controlling a single device, a group, evaluating the operator, and forming an integral algorithm for improving the solution of the problem of monitoring the Earth's surface.

The hypothesis of the scientific problem is the synthesis of optimal control of a multi-position system of autonomous aerial objects with conflicting requirements, which is achieved by using methods and models that create functionally stable control, stabilization of the mutual position of unmanned aerial vehicles in the group, the required reconfiguration and topology of the group, as well as the required bandwidth of the data transmission channel.

Scientific novelty of the results obtained:

1. A method for controlling the movement of a multi-agent system, in which the agents are UAVs, has been proposed for the first time, equipped with measurement and control devices, which, unlike existing methods, incorporates not only the error of the group's deviation from the specified route, but also two additional special signals derived from the potential energies of attraction between agents and their repulsion from neighbours and obstacles, thereby ensuring integrity and safety during movement. The control law also provides for changes to the group's configuration whilst overcoming obstacles, ensuring that the integrity and size of the group structure are maintained, thereby enabling the execution of group behaviour and navigation tasks in a dynamic environment.

2. A method for controlling a quadcopter-type UAV has been developed for the first time through the introduction of a hybrid adaptive control system to ensure accurate reproduction of the aircraft's lateral motion; unlike existing methods, this system incorporates different control laws, whereby the coarse channel minimises the error of deviation from the set trajectory in the shortest possible control time, enabling the phase coordinates of the controlled object to be rapidly moved into the range of the more precise channel, which operates according to a proportional control law.

3. A method is proposed for the first time for tuning gradient-type proportional-integral-derivative (PID) controllers under conditions of a priori uncertainty in the parameters of the mathematical model, with an adaptive tuning step, in which, unlike existing methods, local minima are avoided by optimising the step size for changing the parameters of interest using Lagrange multipliers, thereby ensuring computational simplicity, rapid convergence and the possibility of online tuning in real time.

4. A method for generating UAV routes based on Bézier curves has been improved; this method differs from existing ones in that it uses a minimum number of waypoints, ensuring a smooth trajectory and acceptable curvature values whilst retaining the property of invariance to scaling.

5. The method of information processing during UAV control has been further developed to ensure reliable two-way information transmission between the UAV's onboard computer and the operator, which differs from existing methods in its assessment of the downlink channel for established flow control methods. Flow control should be performed using the ARQ scheme, which enables selective selection and maximizes the receiving channel's throughput.

6. The multi-level structure of a multi-position system of autonomous aerial vehicles has been improved by combining different addressing schemes, which ensures effective interaction between agents in a multi-agent system. This enables such a system to perform tasks with greater accuracy and efficiency, as well as to adaptively change the swarm's configuration through the introduction of a consensus mechanism.

7. The developed UAV group control system has been further refined, leading to increased efficiency in UAV operations. It is characterized by functional control stability

during the execution of typical tasks, enabling flight plan adjustments and route optimization based on data already received from other UAVs; this increases the likelihood of successful mission completion; significant time savings; the ability to simultaneously survey the territory and expand the area under simultaneous monitoring; the ability to assign different tasks to multi-component UAV group members, taking into account the effectiveness of group topology.

8. The methodology for monitoring a UAV swarm in a dynamic environment has been further developed; it is characterized by the determination of the swarm's precise location and the degree of task completion based on the swarm's aggregate data, and helps identify the optimal scenario for each agent during the swarm's task execution. The proposed methodology can be used in the national economy during the execution of various tasks, helping to ensure decision-making in the shortest possible time when performing collective actions by a multi-position system of autonomous aerial vehicles.

The main results of the work were implemented at: the Central Research Institute of Armaments and Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine by order of the Department of Military-Technical Policy, Development of Armaments and Military Equipment of the Ministry of Defense of Ukraine in the preparation of reporting materials of scientific and research work, code "Stratosfera-R" (act dated September 15, 2016); Scientific and Production Implementing Firm "Geotechnology", Kyiv (act dated 08/18/2022), the Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences in the preparation of reporting materials on the topic of the research project "Development of means of information and analytical support for tasks of ensuring the stability of critical infrastructure facilities in the regional socio-ecosystem under conditions of increasing natural, man-made and social threats" (No. DR 0121U109216, act dated 09/10/2024), the educational process of the National Aviation University in the preparation of bachelors and masters in specialty 126 "Information Systems and Technologies" in the disciplines "Multi-agent Control Systems" and "Intelligent Control Systems in Aviation" (act dated 09/11/2024), the educational process of the National Defense Academy of Ukraine at the Department of Geospatial Support and Application space systems in the academic discipline "Organization of the use of

special complexes to perform reconnaissance tasks" (act dated 07.10.2024); "Magellan Aerospace Agency" LLC, Kyiv (Act No. 1-02/25 dated January 10, 2025).

Practical significance of the results obtained. The mathematical models and methods proposed in this dissertation make it possible to:

1) formalize the process of using a multi-position system of autonomous aerial vehicles for functionally stable control during UAV formation flight under conditions of communication channel failures;

2) ensure accurate reproduction of the vehicle's lateral motion thanks to a two-channel control system for quadcopter-type UAVs;

3) configure PID controllers to control the quadcopter's motion under conditions of a priori uncertainty in the mathematical model, whose quasi-optimal operating mode is only 3% less efficient than the optimal mode, and increase the speed of PID controller parameter tuning, which is 4% faster compared to the built-in algorithm of the Simulink package;

4) develop methods and models for safe interaction based on introducing the "potential field" effect into the control law, which implements the idea of attracting and repelling group agents;

5) improve the effectiveness of UAV deployment through specialized operator training aimed at reducing errors during the execution of assigned tasks.

In the future, it is advisable to investigate in more detail the possibility of applying, within the framework of the developed methods, non-linear schemes for the compromise selection of options for sets of monitoring tools in the conditions of wide variation in ODA priorities due to rapid changes in the operational situation (for example, in the case of a forest fire).

Key words: control system, unmanned aerial vehicle, unmanned aerial system, unmanned aircraft, remotely piloted aircraft system, swarm control, multi-position system, multi-agent system, intelligent information processing system, trajectory planning, motion control, information technology.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БАК – безпілотний авіаційний комплекс

БАС – безпілотна авіаційна система

БПС – безпілотна повітряна система

БПЛА – безпілотний літальний апарат

БЦО – бортова цифрова обчислювальна система

ДІМ – дерево інтелектуальних модулів

ДПЛА – дистанційно пілотований літальний апарат

ЛА – літальний апарат

НС – нештатна ситуація

ОПР – особа, що приймає рішення

ПНК – пілотажно-навігаційний комплекс

РБЗ – розподілена база знань

СППР – система підтримки прийняття рішення

СТС – складна технічна система

ФС – функціональна стійкість

ВСТУП

Актуальність теми. Інформаційні та комунікаційні технології є пріоритетними напрямками розвитку в Україні до 2034 року, як зазначено у Законі України «Про внесення змін до деяких законів України щодо пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та інноваційної діяльності» від 13.01.2024 № 3534-IX. Унаслідок виконання цього закону та загальносвітових трендів відбувається інтеграція інформаційних технологій в усі галузі діяльності людини, зокрема і в аерокосмічній галузі.

Безпілотна авіаційна техніка характеризується масштабованою модернізацією. У повітряний простір різних країн піднімаються безпілотні літальні апарати найрізноманітнішого призначення, аеродинамічних схем, геометричних розмірів і масових даних.

Успіх їх застосування пов'язаний насамперед з бурхливим розвитком мікропроцесорної обчислювальної техніки, систем управління, навігації, передачі інформації, штучного інтелекту. Досягнення в цій галузі дають можливість здійснювати політ в автоматичному режимі від зльоту до посадки, виконувати завдання моніторингу земної (водної) поверхні, а БПЛА військового призначення забезпечувати розвідку, пошук, вибір і знищення цілі в будь-який час доби і за будь-яких метеоумов.

Подальше вдосконалення БПЛА відбувається завдяки застосуванню сучасних інформаційних технологій, насамперед нових навігаційних систем, обладнання, ефективних силових установок, різноманітних датчиків, що робить такі літальні апарати всепогодними, здатними працювати в будь-який час доби і протягом тривалого періоду передавати інформацію в реальному масштабі часу.

Досвід практичного цивільного і військового застосування БПЛА в різних країнах у військових, антитерористичних операціях та конфліктах, під час виконання низки цивільних завдань дає змогу сформулювати перелік завдань, визначити типи і класифікацію БПЛА. Військові завдання за важливістю, складністю, особливістю умов та іншими екстремальними чинниками

перевершують цивільні, і тому основні тенденції сучасного і перспективного розвитку БПЛА пов'язують насамперед з військовим призначенням. Науковий пошук авіаційних інженерів і конструкторів спрямований на формування образу БПЛА, який відповідає виконуваним завданням і визначає роль, межі та умови їх застосування.

У дисертаційній роботі розв'язується наукова проблема розроблення методології синтезу управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів під час виконання колективних дій за наявності штучних та природних перешкод при виконанні завдань за призначенням за мінімальний час на прийняття рішення.

Для виконання завдань у зазначеній постановці на сучасному етапі розвитку науки працями вітчизняних та закордонних учених, як-от: Понтрягіним Л. С., Азарсковим В. М., Артюшиным Л. М., Барановим Г. Л., Боднером В. А. Гостєвим, В. І., Гуріним Л. С., Зіатдіновим Ю. К., Красовським О. А., Креденцером Б. П., Кунцевичем В. М., Лисенком М. М., Машковим О. А., Назаровим О. В., Олссоном Г., Сівовим М. С., Тараном В. А., Черноуськом Ф. Л., Христичем В. І., Атаном М., Фалбом П., Aström K. J., Hägglund T., Чангом Л., Нойштадт Л. В. та ін. створена потужна науково-теоретична основа в галузі теорії оптимальних за швидкістю систем.

Аналіз літератури показав, що на сьогодні напрацьовано різні методи, механізми, принципи і методики управління об'єктом багатопозиційної системи з використанням безпілотних технологій. Це підтверджується проведеними дослідженнями і працями в області застосування безпілотних систем таких учених, як Л. М. Артюшин, О. А. Красовський, О. Г. Коврижкін, В. М. Кунцевич, О. А. Машков, С. П. Мосов, І. О. Попов, А. Ю. Соколов, В. П. Харченко, В. М. Синєглазов, Craig Reynolds, David Ward, Brian L. Stevens, Frank L. Lewis, E. Raymond, Авраам Карем, Ян Хе Кван, Якобсен М. В., Хюн Ен Мока, Бен М. Чен, Ліхуа Се, П. Девід, Осама Хатіб, Бруно Сициліано та ін. Не зупиняючись докладно на аналізі внеску вказаних вище авторів, зазначимо, що результати їх досліджень є фундаментальною базою розроблення теоретичних основ побудови адаптивних

квазіоптимальних систем в умовах апіорної невизначеності, які можливо використати для виконання конкретних часткових завдань проєктування задля підвищення характеристик маневреності автономних повітряних об'єктів. Отже, реалізація наукових досліджень у зазначеному напрямі є багатоплановою, гострою та складною науковою і практичною проблемою.

Останнім часом можливості з застосування безпілотних літальних апаратів розширюються. Водночас одним з найцікавіших напрямів, що розвиваються у світі, є напрям, пов'язаний із забезпеченням групового руху роботів під час виконання колективних операцій, які з різних причин не можуть бути виконаними окремими апаратами [1].

Низку питань керування груповими діями рухомих апаратів, що функціонують на землі, у воді, повітряному просторі вивчали дослідники в різний час, про що свідчать численні джерела.

Передбачається, що під час моделювання системи братимуться до уваги можливості управління змінною групою безпілотних літальних апаратів (БПЛА), яка діє як для реалізації однієї, так і декількох цілей (завдань).

Структура розглянутої системи ґрунтується на сучасному погляді як про можливості керування, так і побудови цієї системи.

Конструктивно система складається з людини-оператора, яка формує завдання елементам групи, пульта керування, управління здійснюється по каналу зв'язку як відкритого, так і закритого типу, і безпосереднього об'єктів керування – безпілотних літальних апаратів. БПЛА має у своєму складі як засоби керування польотом, так і засоби забезпечення виконання поставленого завдання.

Основним об'єктом управління вважається БПЛА, що виконує завдання в групі. Тому природно виникає завдання побудови адекватної математичної моделі БПЛА, як елемента групи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження в дисертаційній роботі проводилися в рамках Закону України «Про Національну програму інформатизації», Указу Президента України від 22 березня 2017 року № 73/2017 «Про Державну програму розвитку Збройних Сил України на період до

2020 року», Указу Президента України від 14 березня 2016 року № 92/2016 «Про Концепцію розвитку сектору безпеки і оборони України». Напрямок дослідження роботи пов'язаний з виконанням низки науково-дослідних робіт, в яких автор приймав участь: шифр «САТУРН» (№ ДР 0117U000086), шифр «ПЛУТОН» (№ ДР 0121U112700), шифр «Стратосфера-Р» (№ ДР 0116U000034).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності застосування багатопозиційної системи, яка складається з окремих безпілотних повітряних об'єктів, завдяки забезпеченню функціонально стійкого управління за комплексного підходу до управління групою БПЛА під час виконання завдань за призначенням.

Підвищення ефективності виконання завдань групового польоту БПЛА розглядається за такими показниками, як надійність керування, структурна компактність, ступінь централізованості, живучість групи.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно виконати такі *наукові завдання*:

1. Обґрунтувати доцільність застосування багатопозиційної системи автономних повітряних об'єктів для визначення типових завдань та показників ефективності функціонально стійкого управління і перспективи.

2. Розробити математичні моделі дистанційно пілотованих літальних апаратів літакового і квадрокоптерного типів та визначити особливості їх параметрів з технологією врахування аеродинамічних характеристик безпілотних систем (БПС) для порівняння результатів моделювання з натурними результатами експерименту.

3. Синтезувати закони управління рухом як окремого БПЛА, так і групи та розробити алгоритм формування маршруту БПЛА.

4. Розробити технологію оброблення інформації під час керування БПС у тріаді «група-борт-оператор» для забезпечення надійного двостороннього передавання інформації між бортовим комп'ютером БПС і оператором.

5. Побудувати систему групового управління БПЛА, що допоможе значною мірою усунути недоліки наявних технічних рішень за рахунок підвищення

ефективності використання БПЛА, а саме: можливість коригування плану та оптимізації маршруту польоту, ґрунтуючись на вже отриманих даних з інших БПЛА; збільшення вірогідності успішності виконання завдання; значний виграш у часі; можливість одночасного обстеження території та збільшення площі одночасного моніторингу; можливість постановки різних завдань для багатокomпонентних учасників групи БПЛА, зважаючи на ефективність топології груп.

6. Розробити методологію виконання моніторингу групою БПС у разі зміни координат у динамічному середовищі для використання як у народному господарстві, так і для виконання завдань в інших галузях економіки та дослідити структуру модернізованої багаторівневої системи управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів для функціонально стійкого управління під час виконання групових завдань.

Об'єкт дослідження – процес управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів.

Предмет дослідження – науково-методологічний апарат теорії управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів за комплексного підходу, який містить БПЛА, групу БПЛА та оператора.

Методи дослідження: Для розв'язання поставленої в дисертаційній роботі проблеми використано такі методи: аналіз і синтез методів управління системою автономних повітряних об'єктів під час виконання типових групових завдань для функціонально стійкого управління; методи оптимального управління системою автономних повітряних об'єктів з відомими параметрами; метод оброблення інформації під час керування БПС з використанням комбінації нейронних мереж у процесі побудови траєкторії польоту БПС; методи адаптації; метод навчання нейронної мережі для забезпечення надійного двостороннього передавання інформації між бортовим комп'ютером БПС і оператором, нечіткої логіки в умовах невизначеності, що дає змогу формалізувати якісну інформацію, використовуючи її в процесі прийняття рішень для створення системи правил, що допомагають аналізувати результати роботи системи.

Дослідження відповідає паспорту спеціальності 05.22.13 – навігація і управління рухом за пунктами, а саме: дослідження закономірностей процесів навігації й управління рухом, розроблення методів і засобів управління рухом і орієнтації транспортних засобів і їх потоків.; принципи формування та використання фізичних і інформаційних полів для навігації, спостереження й управління рухом; структурний аналіз і синтез динамічних складних систем і процесів у них, а також ієрархічних, полієргатичних систем навігаційного обслуговування, їх оптимізація й ідентифікація.

Отже, тема дисертаційної роботи «Методологія синтезу управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів» вважається актуальною. Під багатопозиційною системою розуміємо систему, в якій кілька просторово-рознесених позицій (стаціонарних та рухомих) працюють спільно для виконання завдань за призначенням.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Уперше запропоновано метод управління рухом мультиагентної системи, агентом якої є БПЛА, обладнаний засобами вимірювання та управління, який на відміну від наявних містить не тільки похибку відхилення групи від заданого маршруту, а й ще два спеціальні сигнали, які є похідними від потенціальних енергій притягання агентів і їх відштовхування від сусідів і перешкод, що гарантує цілісність і безпеку в процесі руху. Закон керування передбачає також зміну конфігурації групи під час долаття перешкод, за яким цілісність і розмір групової структури не втрачаються, що дає змогу виконувати завдання групової поведінки та навігації в динамічному середовищі.

2. Уперше розроблено метод управління БПЛА квадаторного типу завдяки введенню гібридної адаптивної системи керування для забезпечення точного відтворення бокового руху апарата, який на відміну від відомих містить різні закони управління, утім грубий канал забезпечує мінімізацію помилки відхилення від заданої траєкторії за мінімальним часом керування, що дає змогу швидко переміщати фазові координати об'єкта управління в область досяжності точнішого каналу, який функціонує за пропорційним законом керування.

3. Уперше запропоновано метод налаштування пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД)-контролерів градієнтного типу за умов апріорної невизначеності параметрів математичної моделі з адаптивним кроком налаштування, у якому на відміну від наявних локальні мінімуми вилучаються оптимізацією кроку зміни шуканих параметрів з використанням множників Лагранжа, що дає можливість отримати обчислювальну простоту, швидкість збіжності, можливість онлайн-налаштування в реальному масштабі часу.

4. Удосконалено метод формування маршруту БПЛА на основі кривих Без'є, який відрізняється від наявних мінімальною кількістю маршрутних точок, що забезпечує гладкість траєкторії та прийнятні значення кривизни при збереженні властивості інваріантності до масштабування.

5. Набув подальшого розвитку метод оброблення інформації під час керування БПС для забезпечення надійного двостороннього передавання інформації між бортовим комп'ютером БПС і оператором, який відрізняється від наявних оцінюванням каналу завантаження для встановлених методів керування потоком. Керування потоками має відбуватися за схемою ARQ, яка надає можливість селективного вибору та максимальної пропускної здатності приймальному каналу.

6. Удосконалено багаторівневу структуру багатопозиційної системи автономних повітряних об'єктів завдяки поєднанню різних схем адресації, що забезпечує ефективну взаємодію агентів у мультиагентній системі, яка дає змогу підвищити точність та оперативність виконання завдань такою системою, а також адаптивно змінювати конфігурацію рою завдяки введенню механізму консенсусу.

7. Набула подальшого вдосконалення побудована система групового управління БПЛА, що приводить до підвищення ефективності використання БПЛА, яка відрізняється функціональною стійкістю управління під час виконання типових завдань, що дає змогу коригувати план та оптимізацію маршруту польоту, ґрунтуючись на вже отриманих даних з інших БПЛА; збільшення вірогідності успішності виконання завдання; значний виграш у часі; можливість одночасного обстеження території та збільшення площі одночасного моніторингу; можливість

постановки різних завдань для багатокomпонентних учасників групи БПЛА зважаючи на ефективність топології груп.

8. Зазнала подальшого розвитку методологія виконання моніторингу групою БПС в динамічному середовищі, яка відрізняється визначенням точного місцезнаходження групи БПЛА і ступенем виконання завдання на основі загальних даних групи та допомагає визначити кращий сценарій для кожного агента під час виконання завдання групою. Запропонована методологія може бути використана в народному господарстві у процесі виконання різних завдань, що допомагає під час виконання колективних дій багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів забезпечити прийняття рішення за мінімального часу.

Практичне значення одержаних результатів.

Запропоновані в дисертаційній роботі математичні моделі та методи дають змогу:

1) формалізувати процес застосування багатопозиційної системи автономних повітряних об'єктів для функціонально стійкого управління під час реалізації групового польоту БПЛА в умовах відмов інформаційного каналу;

2) забезпечити точне відтворення бокового руху апарата завдяки двоканальній системі керування БПЛА квадаторного типу;

3) здійснити налаштування ПД-контролерів для керування рухом квадатора за умов апіорної невизначеності математичної моделі, квазіоптимальний режим роботи якого поступається оптимальному режиму лише на 3 %, та підвищити швидкість налаштування параметрів ПД-контролерів, яка порівняно з вбудованим алгоритмом пакету Simulink швидше на 4 %;

4) розробити методи та моделі безпечної взаємодії на основі введення в закон керування ефекту «потенційного поля», яке реалізовує ідею притягування та відштовхування агентів групи;

5) підвищити ефективність застосування БПЛА завдяки спеціальній підготовці операторів, що спрямована на зменшення помилок під час виконання завдань за призначенням.

Основні результати роботи реалізовані у: Центральному науково-дослідному інституті озброєння та військової техніки Збройних Сил України за замовленням Департаменту військово-технічної політики, розвитку озброєння та військової техніки Міністерства оборони України під час підготовки звітних матеріалів науково-дослідної роботи, шифр «Стратосфера-Р» (акт від 15.09.2016 р.); Науково-виробничій впроваджувальній фірмі «Геотехнологія», м. Київ (акт від 18.08.2022 р.); Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ під час підготовки звітних матеріалів за темою НДР «Розробка засобів інформаційно-аналітичної підтримки завдань забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури в регіональній соціоєкосистемі за умов зростання природних, техногенних і соціальних загроз» (№ ДР 0121U109216, акт від 10.09.2024 р.); навчальному процесі Національного університету «Київський авіаційний інститут» під час підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології» у дисциплінах «Мультиагентні системи управління» та «Інтелектуальні системи управління в авіації» (акт від 11.09.2024 р.); освітньому процесі Національної академії оборони України на кафедрі геопросторової підтримки та застосування космічних систем у навчальній дисципліні «Організація застосування спеціальних комплексів для виконання завдань розвідки» (акт від 07.10.2024 р.); ТОВ «Аерокосмічне агентство «Магеллан», м. Київ (акт № 1-02/25 від 10.01.2025 р.).

Достовірність наукових результатів, отриманих у дисертаційній роботі, забезпечена коректними постановками завдань, використанням сучасного апробованого математичного апарату, підтверджена результатами імітаційного моделювання і збіжністю отриманих результатів з відомими в окремих випадках.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційного дослідження отримані особисто автором [21, 23]. У роботах, написаних у співавторстві, особистий внесок здобувача такий: проаналізовано напрями застосування БПЛА в інтересах Збройних Сил України та їх тенденції [1]; проведено порівняльний аналіз застосування космічних систем дистанційного зондування Землі та БПЛА для виконання завдань спостереження [2];

проаналізовано досвід використання космічних систем та безпілотних авіаційних комплексів в сучасних локальних конфліктах та перспективи їх розвитку [3]; досліджено застосування безпілотних літальних апаратів під час виконання колективних дій [4]; уперше розглянуто завдання термінального керування системами з мінімальним часом перехідного процесу в умовах параметричної невизначеності інтервального типу та наявності обмежених перешкод у каналах вимірювання фазових координат, а також методи, що дають гарантоване їх вирішення [5]; досліджено термінальне керування динамічною системою третього порядку в умовах обмежених перешкод [6]; розглянуто розв'язання проблеми керування групою БПЛА, що рухаються за заданим маршрутом з використанням гладкого закону руху групи з введенням контрольованої компоненти для надання гарантій безпеки руху [7]; проведено синтез закону керування перемиканням для автопілота квадрокоптера [8]; розглянуто оцінювання підготовки оператора-пілота в конфліктній ситуації [9]; розглянуто стабілізацію просторового положення квадрантора методом бекстепінгу [10]; проведено планування траєкторій декількох БПЛА з урахуванням мінімальної довжини маршруту БПЛА в умовах обмеження на криву, заснованого на кривих Без'є [11]; розроблено спосіб формування маршруту безпілотного літального апарата [12]; розроблено алгоритм керування мультиагентною системою в потенційному полі [13]; досліджено керування групою БПЛА, що рухаються за законом керування з гладкою функцією часу з фіксованими перешкодами [14]; запропоновано інтеграційний підхід до вибору маршруту групи БПЛА [15]; проведено реконфігурацію мультиагентних систем в умовах завад [16]; розроблено алгоритм налаштування вагових коефіцієнтів нейроконтролера під час керування динамічними об'єктами [17]; проведено аналіз варіантів структур побудови груп безпілотних літальних апаратів під час виконання колективних завдань [18]; проаналізовано засоби збору інформації (зважаючи на БПЛА) для геоінформаційних систем [19]; визначено завдання векторної оптимізації комплекту засобів оптико-електронного спостереження для аерокосмічного моніторингу лісових масивів [20]; розроблено методику обґрунтування комплекту засобів моніторингу лісових пожеж [21]; опрацьовано

методику векторної оптимізації складу комплексу оптико-електронної апаратури для виконання завдань моніторингу районів різної площі з використанням космічних та повітряних засобів [22]; проведено оцінювання бойових можливостей з радіозаглушення супутникового зв'язку з використанням БПЛА постановки перешкод в операціях [23]; розроблено методику оцінювання стійкості структури системи супутникового зв'язку під час передавання інформації на БПЛА [24]; розглянуто загальний підхід до розрахунку показників інформаційного трафіка повітряної інформаційної системи [25]; запропоновано підхід, що ґрунтується на введенні узагальненого показника продуктивності оператора, який є лінійною функцією часткових різнорідних критеріїв якості з невідомими ваговими коефіцієнтами [26]. В усіх роботах, виконаних у співавторстві, співавтори брали участь в обговоренні результатів і підготовці публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації, практичні висновки і рекомендації, одержані в ході роботи, доповідались на наукових конференціях і семінарах у Національному університеті оборони України імені Івана Черняхівського, апробовані та оприлюднені під час конференцій: III Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології, системний аналіз і моделювання соціоекологоекономічних систем» (м. Київ, 19–21 жовтня 2011 р.); V Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (ПРТК-2012) (м. Київ, 15–16 травня 2012 р.); V Всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» (м. Київ, 25–27 вересня 2012 р.); XIX Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика/AUTOMATICS – 2012» (м. Київ, 26–28 вересня 2012 р.); XI Міжнародна конференція доповідей «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)» (м. Вінниця, 9–11 жовтня 2012 р.); VI Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2013)» (м. Київ, 27–29 травня 2013 р.); XX Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика / Automatics – 2013» (м. Миколаїв, 25–27 вересня 2013 р.); X наукова конференція «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (м. Харків, 9–10 квітня 2014 р.); V міжнародна науково-

практична конференція «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики» (м. Луганськ, 5–8 травня 2014 р.); VII науково-технічна конференція «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення» (м. Київ, 23–24 жовтня 2014 р.); XX Всеукраїнська науково-практична конференції «Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнологічних систем спеціального призначення» (м. Житомир, 28 листопада 2014 р.); науково-практична конференція «Перспективи розвитку автоматизованих систем управління військами та геоінформаційних систем» (м. Львів, 29 листопада 2014 р.); науково-практична конференція «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки та досвід її експлуатації в особливий період» (м. Київ, 25 червня 2015 р.); 2015 IEEE 3rd International Conference “Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)”, October 13–15, 2015; Міжнародна науково-практична конференція «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» (м. Київ, 7 квітня 2016 р.); 2016 IEEE 4th International conference «Methods and systems of navigation and motion control»(MSNMC) (October 18–20, Kiev); науково-практична конференція «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи» (м. Київ, 4 жовтня 2017 р.); 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT 2018). Kyiv, Ukraine. 24–27 May 2018; 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). October 16–18, 2018. Kyiv, Ukraine; IV Міжнародна науково-практична конференція «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» (м. Київ, 10 квітня 2019 р.); 2019 IEEE 5th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development, APUAVD 2019. October 22–24, 2019. Kyiv, Ukraine; CMiGIN 2019 (Conflict Management in Global Information Networks), Lviv, Ukraine, November 29, 2019; 2020 IEEE 6th International conference “Methods and systems of navigation and motion control”(MSNMC), October 20–23, Kiev, Ukraine; 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development, APUAVD 2021. October 19–21, 2021, Kyiv, Ukraine; VI Міжнародна

науково-практична конференція «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» (м. Київ, 23 травня 2023 р.); VII Міжнародна науково-практична конференції «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» (м. Київ, 24 квітня 2024 р.); XV Міжнародна науково-практична конференції «Комп'ютерні системи та мережеві технології» (м. Київ, 25–26 квітня 2024 р.); 2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, Ukraine. 2025; VIII Міжнародна науково-практична конференція «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» (м. Київ, 30 жовтня 2025 р.); IX Міжнародна науково-практична конференція «Нові горизонти в наукових дослідженнях: забезпечення військ (сил) та застосування геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» (м. Київ, 28 квітня 2026 р.).

Публікації. Наукові положення, висновки і рекомендації, які виносяться на захист, одержані автором особисто. З наукових праць, які опубліковані у співавторстві, в дисертації використані лише ті ідеї і положення, які є результатом власних досліджень здобувача. За результатами дослідження опубліковано 57 наукових праць, із них 2 колективні монографії, 24 наукові статті у фахових виданнях, із них 19 наукових статей у наукових фахових виданнях України, 6 наукових статей у виданнях, внесених до наукометричної бази даних Scopus; 30 праць (7 внесені до наукометричної бази даних Scopus), які засвідчують апробацію матеріалів дисертації; 1 патент на корисну модель (додаток Ж).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків і має 302 сторінки основного тексту, 88 рисунків, 14 таблиць, 8 додатків на 48 сторінках. Список використаних джерел містить 363 найменування і займає 45 сторінок. Загальний обсяг дисертаційної роботи – 401 сторінка.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАНЬ ГРУПОВОГО УПРАВЛІННЯ

Завдання управління колективною поведінкою безпілотних літальних апаратів належить до найцікавіших і є одним із завдань інтенсивного розвитку на сучасному етапі – управління групою мобільних роботів.

Групове або колективне управління є одним з пріоритетних напрямів розвитку технічних систем. Це пов'язано зі збільшенням кількості технічних об'єктів, наділених певною часткою штучного інтелекту, що своєю чергою потребує вирішення технічних питань, пов'язаних з організацією їх спільних дій, як-от узгодженість, взаємодопомога і безпека.

У цивільній галузі пропонується застосування спостереження за інфраструктурою об'єктів, проведення пошуково-рятувальних операцій на великих територіях, може бути придатним для державних підприємств, приватних та інших структур. Особливо корисним застосування цієї розробки очікується для виконання завдань Міністерства надзвичайних ситуацій України та Міністерства оборони України.

1.1. Типові завдання групового управління

Моніторинг. За аналізом результатів льотної практики доводиться виконувати завдання забезпечення перекриття значних просторових територій або ж досягнення віддаленої точки. До цих завдань належать гасіння пожеж, геодезична розвідка місцевості, транспортні, сільськогосподарські та оборонні завдання. Через низку причин (часові обмеження, ефективність виконання завдань та ін.) ці завдання можуть вимагати колективного використання літальних засобів.

Порівняно з пілотованими засобами застосування безпілотних засобів є напрямом, що інтенсивно розвивається останнім часом та визначається низкою переваг, які мають безпілотні засоби, а саме:

- низьку вартість експлуатації і підготовки обслуговуючого персоналу для безпілотних засобів порівняно з пілотованими;
- безпечну експлуатацію в середовищах з підвищеним для здоров'я людини ризиком;
- можливість ефективного виконання однотипних, багаторазово повторюваних завдань;
- виконання складних для пілотованих засобів елементів польоту (маневри зі швидкістю, висотою, політ в обмежених просторових середовищах);
- реалізацію в менших, ніж пілотовані кошти розмірах.

Ідеї, що описуються в [1–3], показали спроможність проведених досліджень, де пропонується використання моделі польоту одиночних літальних апаратів за відповідної їх модернізації для обмеженої групи з визначенням шляхів їх подальшого розроблення. Особливістю застосовуваних моделей є дослідження поздовжнього руху групи літальних апаратів і побудова відповідної їм математичної моделі колективного руху на прямолінійній ділянці траєкторії польоту.

Доставлення вантажу. Розглядається розроблення технології інтелектуального моніторингу наземних рухомих та нерухомих об'єктів та доставлення вантажів на основі мультиагентного підходу за допомогою групи БПЛА. На відміну від наявного підходу до моніторингу та доставлення вантажів, який проводиться деякими роботехнічними комплексами, такий підхід має низку переваг, що полягають в покритті більшої території або доставленні вантажу великого розміру, зменшенні часових витрат на виконання завдання, можливості уточнення та виконання ситуаційних завдань в обмеженому чи замкненому просторі. Передбачається, що виконання завдань спирається на принципи самонавчання, самоорганізації для виконання керованих або автономних дій. Основними методичними напрацюваннями авторів проєкту є розроблення методології теорії прийняття рішень із застосуванням інтеграції моделей прийняття рішень у разі управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА) в єдиному повітряному просторі (ПП), спільного прийняття рішень (CDM – collaborative

decision making) у разі виникнення позаштатних ситуацій в умовах ризику і невизначеності, розроблення методології побудови систем термінального управління і робастних методів оцінювання та адаптивного керування. У процесі виконання дослідження створено методичні засади щодо побудови керованої групи БПЛА для проведення моніторингу земної поверхні та доставлення вантажів. Головним теоретичним надбанням проєкту стане створення нових моделей та методів групового використання БПЛА, визначення нових способів та форм керування для забезпечення ефективного виконання нових завдань науки і практики.

Останнім часом дедалі більшої уваги набуває завдання моніторингу стану господарчої інфраструктури, територій, попередження аварій та надзвичайних ситуацій, доставлення вантажів. Моніторинг та доставлення вантажів здійснюються рухомими засобами, оснащеними відповідним обладнанням. На жаль, точність та об'єктивність цих засобів в окремих випадках недостатні. Причинами цього явища є віддаленість, низька розрізнявальна здатність бортового обладнання, вартість процесів моніторингу, доставлення та час оброблення отримуваної інформації. Альтернативою цьому може слугувати система, що складається з декількох автономних засобів, які оснащені системою комп'ютерного зору та здатні проводити інтелектуальні дії з мінімальним втручанням людини-оператора.

Наразі, не повністю виконані завдання автономної роботи БПЛА, майже кожний безпілотний авіаційний комплекс у контурі управління містить людину-оператора, яка контролює та керує діями. Створення керованої групи БПЛА, кожний елемент якої може автономно виконувати низку дій, здатний виконувати завдання, також, у взаємодії з подібними апаратами, слід відносити до перспективних розробок, аналогів яких у світі поки що немає. Сучасне застосування БПЛА для авіаційних перевезень належить до ефективної організації міської повітряної мобільності (UAM – Urban Air Mobility) і полягає у створенні безпечної та ефективної системи авіаційних перевезень пасажирів і вантажів у містах/між містами, включно з доставлення невеликих вантажів та іншими

послугами. Основними проблемами під час впровадження UAM є узгодження польотів БПЛА з впливом на навколишнє середовище та безпекою для міста. Організація та планування безпечної та ефективної системи в міській місцевості та навколо неї з використанням БПЛА в єдиному повітряному просторі наразі важливі.

За розробленими методами адаптивного термінального керування одиночними об'єктами управління мета керування рухом досягається в умовах апіорної невизначеності щодо параметрів об'єктів керування та за наявності завад в інформаційних каналах. Отримані результати стосуються динамічних систем другого та третього порядків. Визначено типові маршрути, що можуть бути використані для моніторингу та доставлення вантажів. Розроблено новий підхід для формування маршруту керованих засобів, який ґрунтується на принципах побудови просторових кривих, що аналогічні кривим Без'є, які використовуються в комп'ютерній графіці для побудови графічних об'єктів. Перевагою такого підходу є зменшена кількість точок, за якими здійснюється побудова маршруту. Визначено структуру системи керування групою БПЛА, яка має три рівні: інтелектуальний, на якому формується послідовність дій виконання польотного завдання, рівень розподілу завдань та виконавчий рівень. Встановлено закони управління та типи протоколів, якими визначаються узгодженість дій та передавання даних. Проаналізовано відстеження заданої траєкторії руху групи, що складається з обмеженої кількості рухомих засобів, які не мають жорсткого зчеплення між собою. Проведено оцінювання пропускну здатності групи робототехнічних засобів, що виконують завдання моніторингу, проаналізовано реконфігурацію такої системи в умовах перешкод та визначено вимоги до інформації, що передається.

Останнім часом актуальною стала концепція «розумного міста» – «smart city», для якої застосування БПЛА є пріоритетним під час доставлення та переміщення вантажів. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень (ІСППР) були розроблені для ефективного розв'язання цих проблем. У системі використовувалися схеми управління БПЛА: оператор – одиночний БПЛА, група

операторів – група БПЛА, оператор – CDR (Central Repeater Drone – центральний ретранслятор-безпілотник) – група БПЛА. Ефективність використання БПЛА для сучасного міста як «розумного міста» має низку проблем: наявність об'єктів інфраструктури, будівель, доріг, забудов, зон відпочинку та природних зон. Проведено роботу щодо організації та визначення маршрутів польотів БПЛА з мінімальними ризиками та максимальною безпекою в місті та навколо з виконанням таких завдань: вибір території, аналіз та оцінювання рельєфу, перешкод та складання карти із зазначенням ризиків проходження перешкод; GRID – аналіз (GRID – General Repository for Interaction Datasets – загальне сховище для наборів даних взаємодії); аналіз обраної території; оцінка ризику комірок GRID залежно від типу зони: від «Заборонена зона» до «Небезпечна зона»; знаходження маршрутів з мінімальним ризиком. Розроблено алгоритми прийняття рішень операторами БПЛА в аварійній ситуації або під час передпольотного планування автономних польотів БПЛА. Алгоритми можуть бути використані для реалізації систем UAM.

Групове або колективне управління є одним з пріоритетних напрямів розвитку технічних систем. Це пов'язано зі збільшенням кількості технічних об'єктів, наділених певною часткою штучного інтелекту, що своєю чергою, потребує вирішення технічних питань, пов'язаних з організацією їх спільних дій, як-от узгодженість, взаємодопомога і безпека.

Важливим завданням колективного управління вважається узгодженість, що проявляється в синхронних рухах з дотриманням інтервалів і дистанцій під час розгляду цих об'єктів у просторі. Це вимагає ефективного керування рухом, наприклад, під час руху за маршрутом. Для автономних засобів різної конфігурації рух за маршрутом – завдання різного рівня складності. Наприклад, під час руху у вільному просторі, де немає перешкод, на маршруті, де є перешкоди, зокрема споруди, або в замкнутому просторі, необхідні хороші характеристики маневреності та орієнтації.

Існує велика кількість досліджень, присвячених мультиагентним системам. Огляд сучасного застосування мультиагентних систем наведено в [4]. У роботі

вказано також на основні проблеми, які наразі не вирішені, що передбачають організацію координації між агентами, безпеку та розподіл завдань.

Закордонні вчені докладають значних зусиль до розроблення алгоритмів інтелектуального моніторингу інфраструктури наземного простору. Технологічною основою інтелектуального моніторингу може бути система кількох БПЛА, з якої будуються інтелектуальні системи, здатні надавати підтримку рятувальним групам. У [5] запропоновано розроблення багатоагентної архітектури, яка дає змогу розгортати системи, що складаються з інтелектуальних агентів, які можуть контролювати середовище, постраждале від катастрофи, і надавати підтримку персоналу в процесі прийняття рішень. Ці відомі заздалегідь середовища характеризуються набором точок інтересу, які критичні з погляду повітряного спостереження та моніторингу.

Архітектура агентної системи повинна забезпечувати виконання таких функцій: відчувати динаміку змін навколишнього середовища, вимірювати ці зміни, вміти їх інтерпретувати, розв'язувати проблеми, які виникають, робити висновки, визначати відповідні дії, зокрема відповідати завданням, які виникають перед системою.

В основі підходу, який викладено в роботі [6], є розвиток теорії побудови маршрутів засобів повітряного моніторингу. Компаніями Amazon і Alibaba розгортаються системи дронів для підтримки доставлення «останньої милі», де використовуються можливості дрона та вантажівки, що створює інноваційний режим доставки. Визначене у такий спосіб завдання оптимізації, відоме як проблема комівояжера з дроном (TSP-D), спрямована на пошук скоординованих маршрутів безпілота та вантажівки для обслуговування списку клієнтів. Для вирішення компромісу між експлуатаційними витратами та часом завершення проблеми пропонується вдосконалений генетичний алгоритм невідомого сортування (INSGA-II – допомагає знайти набір хороших компромісних варіантів). Цей алгоритм може одночасно оптимізувати: мінімальну довжину маршруту; мінімальне споживання енергії; максимальну безпеку (відстань від перешкод); мінімальний час польоту тощо. Управління на основі розподіленого спостерігача

та протоколу навчання з підкріпленням (RL) утворенням БПЛА, що складається з віртуального лідера і кількох наступних апаратів з різною невідомою динамікою, запропоновано в [7].

Маршрути можуть також будуватися з використанням теорії графів [8, 9] і алгоритмами управління мультиагентними БПЛА на основі консенсусу [10, 11], що інтенсивно розвиваються останнім часом. Однак алгоритми останнього типу мають проблеми зі збіжністю та точністю отриманого рішення за обмежений час пошуку.

В одній з останніх робіт авторами [12] запропонована оптимізаційна стратегія для гри з переваженнями, коли об'єкти системи подано в матричній формі. Сформульовано необхідні і достатні умови забезпечення перетворення системи в гру з переваженням за заданим критерієм продуктивності системи, поданої у формі потенціальної функції на основі розроблення належних функцій вартості об'єкта.

Приклади застосування БПЛА у разі виконання складних завдань як у військовій, так і в цивільній авіації, включно з реагуванням на надзвичайні ситуації та стихійні лиха, у сільському господарстві, аерофотозніманні, ретрансляції зв'язку, моніторингу погоди, повітря та якості води та багато інших потенційних застосувань, розглянуто іноземними вченими [13; 14]. Забезпечення можливості виконання безпечних, скоординованих та ефективно інтегрованих польотів дистанційно пілотованих літальних апаратів в єдиній авіаційно-транспортній системі є основною актуальною проблемою сьогодення безпілотної авіації, що перебуває під постійною увагою міжнародної організації цивільної авіації ІКАО [15–16].

Вітчизняними вченими наголошується на необхідності вивчення підходів до оптимізації руху під час колективних дій як важливе наукове завдання [17]. Отримані результати стосуються формулювання окремих вимог щодо руху, застосування сучасних технологій для контролю руху та перевірки висунутих гіпотез. Питання інтелектуалізації моніторингу залишаються відкритими. Найважливішими є стратегія і тактика групової взаємодії; команди і протоколи обміну інформацією; принципи прийняття спільних рішень; підходи до розв'язання

конфліктних ситуацій; прийняття рішень в умовах апріорної невизначеності; встановлення конкретних цілей та розподіл поточних завдань; надання гарантій безпечної динаміки під час виконання спільних завдань.

Очікувані результати можуть бути використані в цивільній та військовій галузях діяльності. У цивільній галузі пропонується застосування спостереження за інфраструктурою об'єктів, проведення пошуково-рятувальних операцій на великих територіях, може бути придатним для державних підприємств, приватних та інших структур. Особливо корисним застосування цієї розробки очікується для виконання завдань Державної служби надзвичайних ситуацій України та Міністерства оборони України.

Окремі результати можуть бути використані для побудови інтерактивних тренажерів для навчання операторів центрів керування технологічними процесами, які застосовуються, наприклад, в об'єктах теплоенергетики та електропостачання.

Методи, методики, алгоритми, підходи щодо інтелектуального моніторингу стануть корисними для агропромислового комплексу країни, Міністерства оборони України та Міністерства внутрішніх справ України [18–29], Міністерства освіти і науки України, Міністерства інфраструктури України.

Основними завданнями моніторингу є спостереження за навколишнім середовищем, що може бути корисним для санітарних та міських служб, які відстежують екологічний моніторинг. Основними завданнями такого моніторингу є оцінювання фактичного стану природного середовища (зокрема процесів, що в ньому відбуваються), прогноз динаміки змін та його стану в майбутньому.

Реалізація таких завдань дасть можливість виконавчим органам отримувати інформацію, необхідну для планування заходів зі зниження забруднення, виділення пріоритетних галузей діяльності, контролю та оцінювання ефективності здійснення природоохоронних заходів; вживати тимчасових заходів щодо зменшення забруднення в небезпечних районах; здійснювати перевірку виконання норм та стандартів якості природних об'єктів; отримувати дані для наукових досліджень; формувати відповідні законодавчі акти.

У сільському господарстві можна підвищити рівень автоматизації технологічних процесів, зниження витрат палива та обслуговування техніки; підвищення контролю роботи техніки та зменшення простоїв.

Забезпечення ефективного контролю трафіку на автомобільних магістралях для зниження ризику дорожньо-транспортних пригод, оптимізація роботи перехрестів, виявлення заторів та збирання даних.

Моніторинг стану ліній електропостачання сприятиме забезпеченню швидкого відновлення пошкодженої ділянки.

Нині ці завдання виконуються наземним стаціонарним обладнанням: фото- і відеореєстраторами, радарми, зондами або обробленням супутникової інформації.

Реальними замовниками системи можуть бути міністерства, відомства, державні служби, приватні підприємства та фізичні особи.

Упровадження цих заходів планується виконувати за допомогою науково-виробничої впроваджувальної фірми «ГЕОТЕХНОЛОГІЯ».

Економічний ефект полягає насамперед в економії державних коштів на розроблення великих проєктів, вивільненні персоналу, що безпосередньо бере участь у виконанні подібних функцій. Також слід брати до уваги зменшення ризиків, пов'язаних з життям людини, точнішим та продуктивнішим виконанням завдань, економії часу та зусиль під час колективного виконання завдань БПЛА за призначенням.

Соціальний ефект буде досягнутий у забезпеченні корисними алгоритмами та методиками щодо управління групою об'єктів з мінімальним втручанням людини-оператора.

1.2. Планування групових дій БПЛА в просторі

Дослідження можливостей планування групових дій рухомих об'єктів (наземні транспортні засоби, роботи, літальні апарати) традиційно проводяться в двох напрямках: незалежна маршрутизація і спільна маршрутизація. У першому випадку кожному з учасників групи призначається область відповідальності, і

вибір маршруту здійснюється для кожного з учасників окремо. У разі спільної маршрутизації всі пункти маршруту перебувають у загальній відповідальності, і планування проводиться для всіх учасників групи одночасно.

Методи незалежної маршрутизації. Завдання незалежної маршрутизації є аналогом завдання комівояжера [30], яке належить до класу завдань комбінаторної оптимізації і не має єдиного точного методу виконання, що дає змогу отримати оптимальний за довжиною маршрут за кінцевий час. Тому більшість досліджень ведуться в напрямку так званих евристичних методів, що дають рішення за кінцевий час, але не гарантують його оптимальність.

Завдання комівояжера формулюється так: для деякої групи міст з відомими відстанями між ними потрібно знайти найкоротший маршрут відвідування кожного міста один раз з поверненням у початкову точку. Було запропоновано безліч як обчислювальних, так і евристичних алгоритмів виконання цього завдання, серед яких як найефективніші виокремлено такі [31]:

- метод гілок і границь організації повного перебору;
- метод пошуку аналітичного виразу функції ризику;
- генетичний алгоритм;
- нейронні мережі.

Метод пошуку аналітичного виразу функції ризику. Цей метод запропонований і розглянутий у роботах [32–34]. Як найпростіша аналітична форма прийняття рішень подається функція ризику, яка допомагає визначити найвигідніший і першочерговий пункт у кожній точці обльоту. Першочерговим ставав той пункт, для якого функція ризику мінімальна. Як таку функцію вибирають ступеневий поліном другого порядку відносно приросту географічних координат X і Y розташування пункту призначення на карті:

$$F_j = b_1X_j + b_2Y_j + b_3X_j^2 + b_4Y_j^2 + b_5X_jY_j,$$

де X_j , Y_j – різниця між відповідною координатою j -го пункту і координатою поточного стану літального апарата.

Коефіцієнти $b_1 \dots b_5$ визначають під час самонавчання на прикладах.

Алгоритм самонавчання для визначення коефіцієнтів полінома складається з таких кроків:

1. Задається деяке опорне значення вектора $b_1(0), b_2(0), b_3(0), b_4(0), b_5(0)$.
2. Здійснюється маршрутизація польоту в ненавченому стані, знаходиться послідовність правильних рішень.
3. Створюються відхилення коефіцієнтів $(b_i + \Delta b)$ по черзі; знову оцінюється успіх поведінки,
4. Кращий варіант стає опорним для наступного кроку самонавчання.

До недоліків запропонованого підходу віднесено необхідність формування прикладів навчання, які являють собою оптимальні маршрути обльоту об'єктів.

Методи спільної маршрутизації. Завдання планування групового польоту за умови багатьох цілей, які заздалегідь невідомі та з огляду на динамічні властивості керованих об'єктів, не повністю опрацьоване. Можна виокремити два напрямки досліджень:

- завдання багатьох комівояжерів;
- маршрутизація транспортних засобів з кількома депо.

Завдання багатьох комівояжерів – це ускладнене завдання мандрівного комівояжера. Завдання багатьох комівояжерів формуються так: задано N клієнтів і m комівояжерів, для кожного з яких необхідно визначити маршрут відвідування клієнтів, такий, що всі клієнти повинні бути одноразово обслужовані одним з комівояжерів, сумарна довжина маршрутів усіх комівояжерів повинна бути мінімальною. Після закінчення обслужовування, комівояжери повинні зібратися в місці старту (депо на рис. 1.1).

Серед методів виконання таких завдань виокремлюють імітацію відпалу [35, 36], нейронні мережі Кохонена [37–29] і Хопфилда [40–42], проте найбільшого поширення мають генетичні алгоритми [43–46]. Багато присвячених їм робіт пов'язані, з одного боку, з різноманітністю методик уявлення маршруту

хромосомами, з іншого, з різноманітністю генетичних операцій, зумовлених тим, що класичні генетичні операції мутації і схрещування для завдання комівояжера не можуть бути застосовані, оскільки створюють маршрути з повторюваними пунктами, порушується також умова обслуговування всіх пунктів.

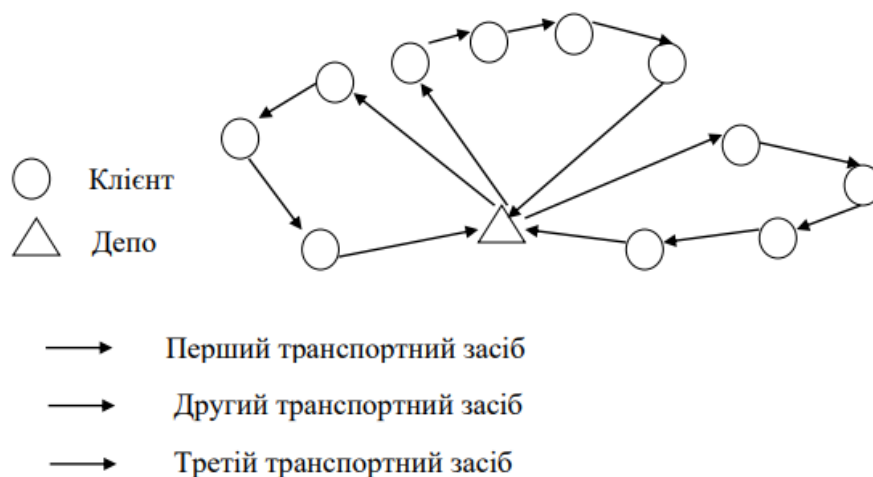


Рис. 1.1. Завдання багатьох комівояжерів

Маршрутизація транспортних засобів з кількома депо аналогічна завданню багатьох комівояжерів, за винятком того, що кінцевий та вхідні пункти маршруту комівояжерів не збігаються (рис. 1.2).

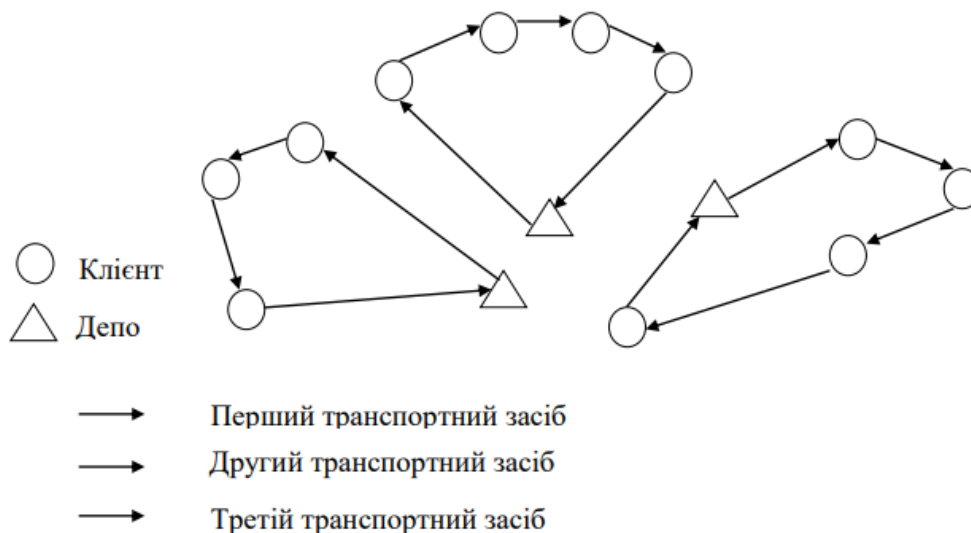


Рис. 1.2. Маршрутизація транспортних засобів з кількома депо

У праці [45] пропонується використовувати дві хромосоми, перша є номером пункту в маршруті, друга призначає комівояжеру пункт, розташований у відповідній позиції першої хромосоми. Отже, для подання маршруту цей метод

потребує пари хромосом завдовжки n (рис. 1.3, а), де пункти 2, 8, 12 і 9 будуть обслуговані комівояжером 2 у цій послідовності, пункти 5, 14, 10 і 15 відвідають комівояжеру 1, а решта відповідно 3 і 4 комівояжерам). Якщо m – кількість комівояжерів, під час використання такої схеми моделювання існує $n!(m^n)$ можливих розв'язків задачі.

У праці [46] пропонується подання маршрутів за аналогією з традиційним завданням комівояжера за допомогою однієї хромосоми з її подовженням на одну позицію на кожного додаткового комівояжера (рис. 1.3, б). Негативні числа використовуються в пункті, де відбувається зміна одного комівояжера наступним, комівояжер 1 відвідає пунктам 2, 5, 14, 6, комівояжер 2 – 1, 11, 8, 13 пунктам і т.д). Довжина хромосоми за таких умов $n + m$, де m – кількість комівояжерів. Для такої схеми моделювання існує $(n + m - 1)!$ можливих розв'язків.

У праці [46] хромосома розбивається на дві частини. Перша являє собою перестановку n пунктів у маршруті, друга частина завдовжки m є кількість міст, що призначаються кожному з комівояжерів (рис. 1.3, в), комівояжер 1 відвідує пункти 2, 5, 14 і 6, комівояжер 2 – пункти 1, 11 і 8 і т.д.).

Найпоширенішим методом схрещування є циклічний кросовер.

Недолік методів незалежної маршрутизації полягає в неможливості організувати груповий політ із взаємодопомогою.

До загальних недоліків перелічених методів належать обчислювальна складність і необхідність апріорної інформації про кількість пунктів призначення.

Аналіз зазначених методів планування маршруту показує, що їх застосування для планування групових дій у реальному часі обмежене.

Беручи до уваги недоліки наявних методів, новому методу виконання завдання маршрутизації польоту висуваються такі вимоги:

- висока швидкодія для можливості застосування в реальному часі і організації перепланування маршруту;
- облік динамічних властивостей об'єкта управління;
- реалізація групового автономного (без участі оператора) цілерозподілення;

- самонавчання, тобто відсутність вчителя під час навчання, який диктує правильне рішення.

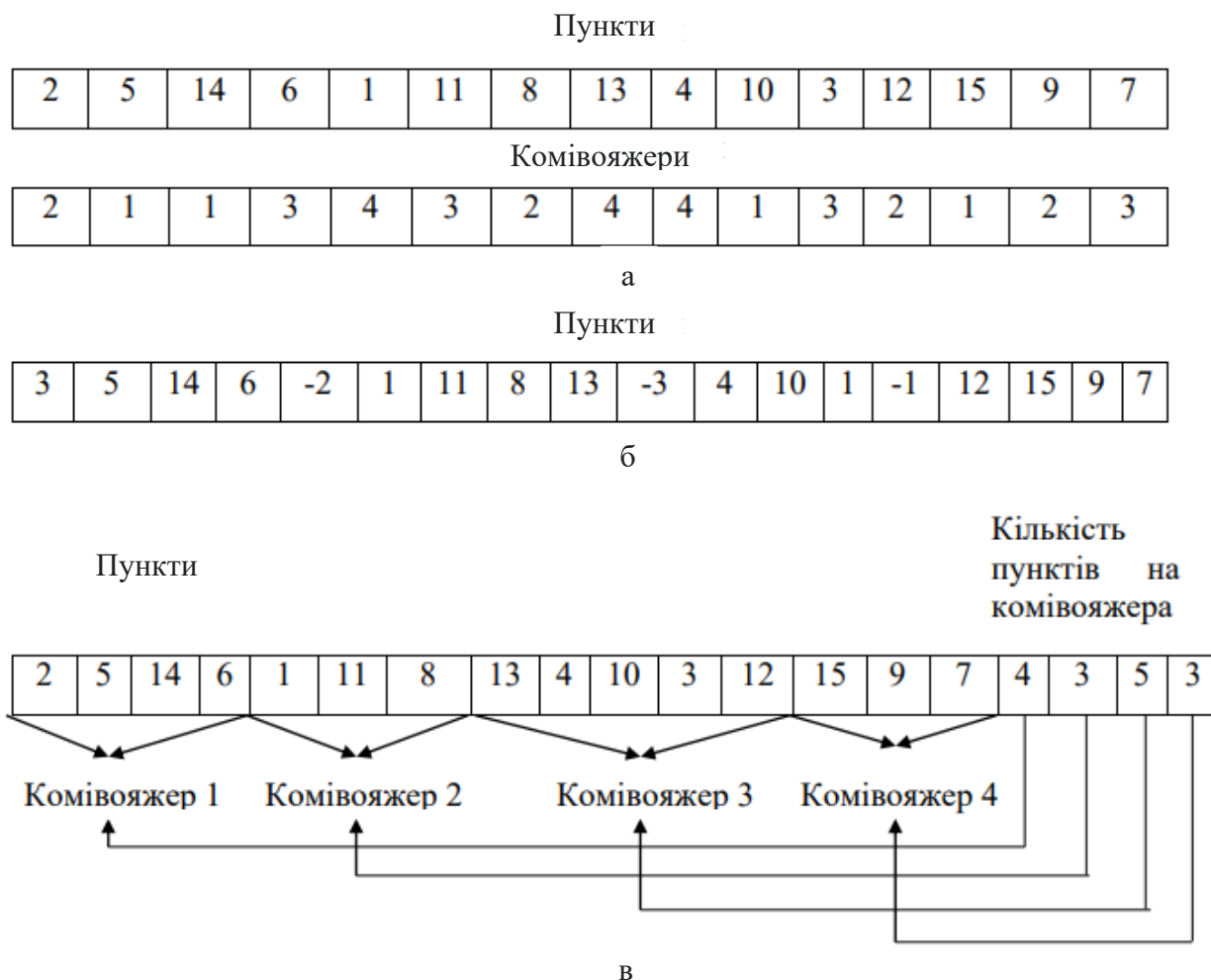


Рис. 1.3. Приклад подання маршрутів у завданні багатьох комівояжерів

Задовольнити перелічені вимоги може бортова інтелектуальна система, що забезпечує оперативне планування групових дій в умовах постійно мінливої польотної ситуації без участі наземного оператора. Розроблення такої системи є одним із завдань під час планування групових дій.

1.3. Проблемні питання організації управління груповим польотом БПЛА

Проблеми реалізації автоматичного управління груповим польотом ЛА, витримування заданого положення ЛА в групі, контролю конфігурації складу

групи на всіх етапах групового польоту вперше були висвітлені в роботах видатних вчених В. А. Боднера, О. А. Красовського, Б. Г. Тарасова, Craig Reynolds, Oussama Khatib, David Ward.

Загальні вимоги до систем автоматичного управління групою ЛА сформульовані в роботах [47–49]:

- обґрунтована можливість роздільного дослідження каналів управління: дистанцією, інтервалом і перевищенням;
- запропоновані різні схеми систем управління;
- обґрунтовано, що під час регулювання тільки за відхиленнями ЛА в групі на всіх режимах польоту виникатимуть незгасаючі власні коливання строю.

У зазначених роботах сформульовано комплексні науково-технічні проблеми автоматичного управління груповим польотом БПЛА:

- визначення схем обміну інформацією, що дають змогу реалізувати ефективне застосування груп БПЛА;
- формування управління групою БПЛА, як системи, що автономно функціонує з обмеженими ресурсами, зважаючи на жорсткі специфічні обмеження;
- ефективне групове застосування БПЛА для цільового виконання завдання.

Відмінною особливістю польоту БПЛА в складі групи є те, що він повинен відбуватися в повністю автоматичному режимі (участь оператора необхідна лише для контролю і оперативного втручання в програму польоту). Це вносить додаткові труднощі в розроблення систем управління груповим польотом БПЛА, на відміну від систем управління груповим польотом ЛА пілотованої авіації, де можливо напівавтоматичне управління конфігурацією.

Розглядаючи загальні питання створення систем автоматичного управління груповим польотом, слід зазначити, що її можливості визначатимуться інформаційними та енергетичними обмеженнями.

До інформаційних належать обмеження, пов'язані з можливостями вимірювальної апаратури. Вони визначаються кількістю датчиків, порогом їх чутливості, діапазоном вимірювань, помилками вимірювань, що виникають

внаслідок внутрішніх і зовнішніх збурень. Помилки в системі виникають у датчиках інформації та каналах зв'язку.

Енергетичні обмеження визначаються характеристиками об'єктів управління. Вони можуть бути двох типів:

1) жорсткі обмеження, накладені на поточні значення керувальних і фазових координат об'єктів;

2) інтегральні або ізопараметричні обмеження, які встановлюють значення функціоналів від координат або управлінь у системі.

Розгляду фундаментальних питань синтезу автоматичних систем управління груповим польотом ЛА зважаючи на весь комплекс енергетичних обмежень присвячені роботи [50, 51].

Важливою проблемою організації групового застосування БПЛА є вибір принципу побудови системи управління: автономного управління або дистанційного керування.

За першого принципу управління зберігання даних про задані траєкторії польоту і визначення відхилень від них відбуваються на борту кожного БПЛА.

Основними недоліками автономного управління є:

- недостатня гнучкість під час виконання завдань оперативного управління групою;

- значний обсяг обчислень у процесі підготовки взаємопов'язаних траєкторій;

- необхідність установа GPS-навігатора, бортового електронно-обчислювального пристрою на кожний БПЛА для зберігання заданих програм польоту на борту.

За дистанційного управління перелічені вище операції виконуються на наземному пункті дистанційного керування (НПДК). Цей варіант дає змогу скоротити масу бортового обладнання і є гнучкішим для управління БПЛА, які здійснюють груповий політ.

За дистанційного управління здійснюється автоматичне слідування відомих БПЛА за головним (що йде попереду) на заданих дистанціях, інтервалах і

перевищеннях. З огляду на геометрію групи, яка визначається тактикою виконання поставленого завдання, встановлюються головний і відомі БПЛА.

Для головного БПЛА задається програмна траєкторія або він управляється оператором НПДК, а відомі БПЛА автоматично сліднують на заданих дистанціях і інтервалах щодо головного (йде попереду).

Як було зазначено вище, для підвищення оперативності управління та скорочення маси бортового обладнання дані про задану траєкторію польоту головного БПЛА доцільно зберігати на НПДК. Водночас для більшої гнучкості системи управління необхідно надати оператору НПДК можливість вибору варіантів розподілу «головний-відомий» між БПЛА з огляду на сформоване конкретне завдання.

За такого способу управління визначення поточних параметрів строю групи відбувається на НПДК. Аналіз можливостей цього способу організації групового польоту БПЛА показує, що він дає змогу значно скоротити порівняно з першим способом трудомісткість складання програм польоту. З огляду зазначених переваг даний спосіб управління може розглядатися для БПЛА тактичного рівня під час подальших досліджень системи групового польоту БПЛА, заснованої на трилатераціоному методі вимірювання параметрів строю групи.

Особливістю обраного способу управління груповим польотом БПЛА є наявність лінії зв'язку між літальними апаратами групи і НПДК. У зв'язку з цим під час розроблення систем автоматичного управління груповим польотом БПЛА актуальними залишаються питання підвищення пропускної здатності каналів зв'язку з НПДК. Нині ці питання вивчені недостатньо і потребують додаткових досліджень [52–54].

Вибір джерел інформації для систем групового польоту ЛА є одним з першочергових і актуальних завдань, що стоять перед розробниками, оскільки сучасні бортові навігаційні системи не мають достатньої точності і потребують внесення поправок та залежать від наявних перешкод і не можуть бути використані для забезпечення групових польотів у зімкнутих порядках [55, 56].

Нині проводяться інтенсивні дослідження із застосування різних фізичних принципів для створення вимірювачів положення ЛА в строю. Як вимірники параметрів строю ЛА пропонуються акустичні, ультразвукові, лазерні, радіоактивні, радіотехнічні та інші системи [56, 57].

Перевагою акустичних і ультразвукових систем є можливість забезпечення поширення сигналів у межах тільки максимально можливої дальності між ЛА, що забезпечує високу стійкість і прихованість. Однак властиві їм недоліки – мала швидкодія, великі габарити апаратури і вплив неоднорідності атмосфери на поширення звукових хвиль – не дозволяють створювати на їх основі досить ефективну систему управління [56, 57].

Лазерні вимірювальні системи також можуть забезпечити необхідну точність визначення положення БПЛА в групі. Окрім того, до складу бортового обладнання багатьох типів БПЛА для виявлення і розпізнавання цілей, виконання прицільних завдань входить оптико-телевізійна система, яку доцільно використовувати додатково і як вимірювач параметрів строю. Оскільки промінь оптичного когерентного генератора вузький, то значні труднощі представляє організація збирання БПЛА в групи, до того ж туман, дощ і дим сильно послаблюють промінь лазера [57].

Дослідження можливості використання γ -променів для контролю місця розташування літальних апаратів у строю забезпечують вимірювання відстані від 15 до 150 км з точністю $\pm 10\%$, що не відповідають сучасним вимогам [57].

Вимірювальні системи, які використовують рентгенівські промені, вимірюють відстань у діапазоні від 25 м до 700 м з точністю $\pm 2\%$. Водночас вимірюється азимут в межах від 0° до 360° з точністю $\pm 2^\circ$ і кут місця до 45° з точністю $\pm 1^\circ$. Забезпечується вимірювання відносного перевищення до 150 м з точністю $\pm 20\%$. Висока точність вимірювання відстаней забезпечується застосуванням дуже коротких імпульсів тривалістю 10–100 нс. Недолік застосування цих систем [57] пов'язаний з обмеженням на кількість літальних апаратів у строю.

Нааявні нині радіотехнічні системи для вимірювання взаємних положень ЛА в повітрі використовують принцип «запит–відповідь» та «частота–час» і призначені для транспортних літаків та вертольотів. Так, наприклад, радіотехнічні датчики, які використовуються в системі AN \ APN-169, вимірюють дальність з точністю $\pm 5 \%$ від вимірюваної дальності, а напрямки – $\pm 2 \%$ [54, 55].

Суттєвим недоліком, вже розроблених систем є те, що вони дають змогу визначити параметри строю групи тільки в розосереджених порядках (інтервали і дистанції в діапазоні 2–30 км).

Окрім того, в разі використання цього принципу вимірювання необхідно встановлювати на борту ЛА високоточні годинники, синхронізовані між собою. Усе це призводить до ускладнення бортової апаратури і обмежує застосування таких систем на БПЛА, для яких найважливішою вимогою є мінімум вартості бортового обладнання.

Найвідповідальнішою для реалізації управління групою БПЛА в умовах зімкнутого строю є радіонавігаційна система для точного вимірювання координат БПЛА на основі трилатераціонного методу вимірювання. Трилатераційний метод – це визначення місця об'єкта за відстанями до трьох або більше відомих точок, ніби перетин колів на карті. У багатопозиційних системах БПЛА можуть виступати рухомими «базовими станціями». Вони вимірюють відстань до цілі (або один до одного) і за допомогою трилатерації визначають точні координати. Це особливо корисно в умовах, коли GPS відсутній або глушиться.

Особливістю трилатераціонного методу вимірювання координат на відміну від відомих радіодалекомірних способів навігації ЛА є те, що визначення місця розташування повітряного об'єкта здійснюється не на самому повітряному об'єкті, а на одному з наземних пунктів і вимірювання дальності здійснюється зі значно більшою точністю, яка характеризується середньоквадратичною похибкою 2–4 м [55].

На землі розташовуються два пункти – відповідно НПДК і відома станція, пов'язані між собою за допомогою інформаційного каналу. Під інформаційним каналом розуміється вся сукупність технічних пристроїв (датчиків,

перетворювачів, приймачів, передавачів, пристроїв сполучення), необхідних для здійснення управління. Обидва наземних пункта розташовані у відомих топоприв'язаних точках, і відстань між ними точно визначено. Для вимірювання дальності до БПЛА з НПДК випромінюється широкосмуговий сигнал з модуляцією за фазою псевдовипадковою послідовністю.

Цей сигнал випромінюється в напрямку можливого знаходження всіх БПЛА, які здійснюють груповий політ. Окрім того, частина сигналу випромінюється в напрямку відомої станції. Приймач БПЛА перевипромінює прийнятий сигнал, який приймається як на НПДК, так і на відомій станції, причому передавач кожного БПЛА перевипромінює прийнятий сигнал із зсувом за частотою. Прийнятий на НПДК сигнал корелюється з наявною в приймачу копією випромінюваного сигналу (опорним сигналом) для точного визначення відносної фази між ними. Фазовий зсув між прийнятим і опорним сигналами пропорційний подвоєній відстані до БПЛА.

На відомій станції прийнятий від БПЛА сигнал порівнюється з сигналом, прийнятим від НПДК і, у такий спосіб, визначається дальність $R_1 + R_2$ (рис. 1.4). Виміряні на відомій станції дальності до кожного БПЛА строю передаються на НПДК і вводяться в наземну ЕОМ. У ту саму ЕОМ надходить і дальність R_1 , виміряна на НПДК. Виміряні значення R_1 і $R_1 + R$ і відомий базис R (рис 1.4) однозначно визначають координати кожного БПЛА, що, своєю чергою дає змогу обчислити поточні параметри строю.

Для збільшення дальності дії системи крім названих пунктів необхідно застосовувати додаткові повітряні пункти (наприклад, безпілотні ЛА), що працюють як ретранслятори.

Точність визначення місця розташування БПЛА щодо НПДК становить на відстані 50 км – 15–20 м, на відстані 80 км – 25–30 м. Висока точність визначення координат літальних апаратів і тим самим параметрів строю допомагає здійснювати групові польоти БПЛА в зімкнутих порядках.

1.4. Необхідність застосування функціонально стійкого управління груповим польотом БПЛА

Аналіз робіт з питань управління груповим польотом БПЛА [62–66] показав, що в області підвищення надійності, живучості, відмовостійкості систем управління існують два принципово різних напрями їх забезпечення.

Перший пов'язаний з науково-технічними рішеннями, спрямованими на зниження ймовірності виникнення відмовних ситуацій у комплексі управління груповим польотом БПЛА [67].

Інший напрям полягає в розширенні області допустимих технічних станів комплексу управління унаслідок позаштатних ситуацій і формування спеціального управління, що парирує наслідки відмов [68, 69].

Основою першого напрямку є використання різних видів резервування, елементів з підвищеною надійністю і різних систем вбудованого контролю.

У рамках цього напрямку, завдяки внесенню конструктивних змін, збільшується загальна надмірність комплексу, впроваджується новий вид надмірності, що, як наслідок, приводить до зниження ймовірності виникнення відмов. Характерним недоліком цього підходу є збільшення маси БПЛА і їх вартості [68].

Дослідження показують, що ефективність цього напрямку для складних технічних систем, що функціонують в умовах жорстких обмежень (бойові авіаційні комплекси, авіаційно-космічні системи), знижується. Дійсно, багаторазове резервування й ускладнення апаратної частини призводить до збільшення ймовірності відмов, що знижує ефективність вжитих заходів [70, 71].

Другий підхід полягає в перерозподілі наявних у системі ресурсів, зміні властивостей алгоритмів управління, зокрема в забезпеченні його функціональної стійкості. Під функціональною стійкістю розумітимемо властивість управління, що полягає в забезпеченні виконання певних функцій в умовах виникнення регламентованої безлічі відмов. Сенс цього підходу максимальне використання всіх наявних ресурсів (енергетичних, інформаційних, структурних,

функціональних) для парирування наслідків відмов. Цей напрям заснований на можливості комплексування ресурсів підсистем складної технічної системи і можливості використання наявних різних форм надмірності для забезпечення функціонування системи після виникнення відмов [70–73].

Перевагою цього підходу є те, що він не потребує кардинальних конструктивних змін (введення великої кількості резервних елементів). Парирування наслідків виникаючих відмов здійснюється можливостями штатних алгоритмів автоматичного управління (функціонально стійкого управління). Це дає змогу розширити сферу застосування комплексу управління унаслідок прийнятих витрат. Однак принципові обмеження, що накладаються на можливість реалізації автоматичного управління (умови спостережливості, керованості і стійкості), визначають граничні можливості вдосконалення комплексів управління в рамках цього підходу.

Як зазначається в [74], ідеологія цього підходу відповідає об'єктивній загальносвітової тенденції розвитку авіаційної техніки (в тому числі і військової), яка полягає в неухильному вдосконаленні як льотно-технічних, так і техніко-економічних показників, розширенні режимів і умов пілотування, цільового застосування, зниження витрат на підтримання необхідного рівня експлуатаційної готовності тощо.

Прагнення до максимального використання технічних можливостей, які закладаються в авіаційну техніку на етапі проектування і виготовлення, є характерними ознаками сучасних прогресивних авіаційних технологій [75].

Слід зазначити, що описані вище напрямки не суперечать один одному, навпаки, вони взаємно доповнюють один одного. Системний характер проблем розвитку складних технічних комплексів вимагає адекватного підходу до їх розв'язання [76–78]. Необхідно комплексне застосування різних методів вирішення. У цьому разі з'являється можливість компенсувати недоліки одного підходу завдяки перевагам іншого підходу.

Теорія функціонально стійких технічних систем, що є методичною основою реалізації цього напрямку, перспективна для складних систем автоматизованого

управління. Дотепер вже розроблені основи методології створення функціонально стійких складних технічних систем [71–74, 77].

Під функціональною стійкістю технічних систем будемо розуміти її властивість зберігати протягом заданого часу виконання своїх основних функцій в межах, встановлених нормативними вимогами, в умовах протидії, а також впливу потоків відмов, несправностей і збоїв [79].

Спочатку методи ФС управління застосовувалися для вдосконалення характеристик складних технічних систем, що працюють в екстремальних умовах, насамперед – авіаційно-космічні системи. Однак розвиток елементної бази, обчислювальних пристроїв, складності сучасних і особливо перспективних авіаційних систем, наявність у них багатьох форм надмірності, введеної конструкторами, дає змогу розширити область застосування методів ФС управління [71–73].

Як зазначається в [73], сучасними завданнями теорії функціонально стійких технічних систем є: подальше вдосконалення методів функціонально стійкого управління і застосування цих методів для виконання прикладних науково-технічних завдань.

Разом з тим, незважаючи на великий науковий інтерес щодо розроблення методів забезпечення ФС управління складними технічними системами, в літературі не отримали належного відображення питання застосування ФС управління для реалізації групового польоту БПЛА в умовах відмов інформаційного каналу.

Це підтверджує актуальність теми дисертаційного дослідження і її важливе значення як для розвитку теорії ФС технічних систем, так і для розвитку теорії групового польоту.

1.5. Постановка проблеми дослідження

У роботі пропонується алгоритм управління обмеженою групою літальних апаратів під час виконання завдання просторового перекриття території заданої площі.

Розглядається виконання завдання моніторингу земної поверхні обмеженого розміру, що потребує застосування безпілотних літальних апаратів. Для виконання такого завдання є система, що містить кілька літальних апаратів і комплекс наземного обладнання. Літальні апарати розрізняються номерами бортів, що мають ознаки ведучого і відомих, між якими організовані зв'язки для гарантування безпеки польоту та координації руху на маршруті. Алгоритмом передбачається як автономний політ, так і керований з наземного пункту управління. У разі потреби може відбуватися перевизначення нумерації бортів за командами з наземного комплексу управління. Для здійснення безпечного польоту кожен літак групи забезпечений радіометричними датчиками, що дають змогу виконати задані дистанцію, інтервал і перевищення, встановлені для елементів групи.

Структурно комплекс наземного обладнання містить командну радіолінію та інформаційний канал оброблення телеметричної інформації. Відправлення команд радіоуправління і приймання інформації контролюється оператором.

Перед початком польоту оператором формуються польотне завдання, яке визначається координатами наземного пункту управління, власного розташування, пункту призначення, допустимий час польоту, допустимі варіанти маршруту польоту, склад групи, ймовірні варіанти побудови конфігурації групи.

На старті встановлюється порядок виходу на маршрут, у процесі старту визначається конфігурація/структура групи для виконання завдання, вибирається маршрут до кінцевого пункту, який у разі потреби може бути змінений, здійснюються координація та взаємодія між елементами групи на маршруті.

У кінцевій точці траєкторії визначається порядок виконання завдання, безпосередньо виконується завдання, контролюється ступінь виконання завдання (зигзаг, спіраль тощо) і приймається рішення про ефективність виконання завдання

на повернення в пункт базування. Передбачуваний алгоритм виконання завдання подано на рис. 1.5, особливістю алгоритму є можливість коригування кожного етапу алгоритму оператором.

Завдання управління багатопозиційною системою повітряних об'єктів передбачає пошук точок інтересу, які являють собою об'єкти ураження, вогнища, завали тощо, на території загальною площею S під час визначення масштабів екологічної катастрофи. Як узагальнений критерій виконання цього завдання виступає мінімум витрат часу та забезпечення точного виконання завдання

$$\min_{u_i} j = \int_0^T \sum_{i=1}^N [a_1 \|u_i(t)\|^2 + a_2 d_i(t) + a_3 \phi_i(t)] dt, \quad (1.1)$$

де a_1, a_2, a_3 – вагові коефіцієнти;

$u_i(t)$ – керувальні впливи;

$d_i(t)$ – відхилення від траєкторії або заданої точки;

$\phi_i(t)$ – ризик зіткнення з іншим БПЛА та перешкодами;

за умов

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = f(x_i(t), u_i(t)), & i = 1, \dots, N, \\ u_i(t) \in U_i, & \forall t \in [0, T], \\ \|p_i(t) - p_j(t)\| \geq R_{\min}, & \forall i \neq j, \\ p_i(t) \in P, & \forall t \in [0, T], \end{cases}$$

де $p_i(t) \in R^3$ – просторові координати i -го БПЛА в момент часу t ;

f – вектор-функція, що описує фізичні характеристики системи;

U_i – доступний простір керувальних впливів;

$R_{\min}$ – мінімально допустима відстань між БПЛА;

P – допустимий простір руху.

Для виконання поставленого завдання може бути залучена група, що складається з n БПЛА. Група досліджує зону екологічної катастрофи паралельно за часом, контролюючи виділену ділянку траєкторії із загальною площею перекриття

$$S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n S_i, \quad (1.2)$$

де n – кількість БПЛА, $i = 1 \dots n$, $n \leq 5$.



Рис.1.5. Алгоритм управління групою БПЛА

Ефект (1.1) вважається досягнутим, якщо досліджена повністю вся територія з площею (1.2), достовірно виявлені вогнища катастрофи і своєчасно видана про них інформація на пункт управління, дані отримані від усіх БПЛА групи. Всі перелічені чинники можна трактувати як окремі події.

Через наявність випадкових і систематичних помилок, що виникають на кожному окремому етапі виконання завдання, критерій виконання завдання групою БПЛА набуває ймовірності змісту, тобто приріст екологічного збитку стає мінімальним, якщо отримана максимальна ймовірність P спільного прояву послідовності залежних подій.

Тоді ефект (1.1) повністю визначається ймовірністю

$$P(ABC) = P(A) P(B/A) P(C/AB), \quad (1.3)$$

де подія A полягає в дослідженні всій території S , подія B – у виявленні всіх вогнищ катастрофи та своєчасному видаванні про них інформації на пункт управління, C – отриманні даних від усіх БПЛА; $P(A)$ – ймовірність успішного виконання події A ;

$P(B/A)$ – умовна ймовірність виконання події B ; $P(C/AB)$ – умовна ймовірність виконання події C .

Застосування цього підходу дає змогу конкретизувати вихідні дані для виконання алгоритму управління, а саме склад групи, вимоги до апаратного забезпечення, вибору необхідного маршруту, встановлення вимог до взаємодії елементів групи на досліджуваній території [80, 81].

Проблемними питаннями, які природно виникають під час виконання зазначеного завдання, є управління окремим БПЛА, управління групою БПЛА, гарантування безпечних дій агентів групи і спроможність оператора адекватно діяти відповідно до ситуації, яка склалася у процесі виконання завдання за призначенням.

Одним із підходів, що може бути застосований під час виконання такого складного організаційно-технічного завдання є побудова системи, що розглядається, як функціонально стійка, що дасть змогу забезпечити виконання зазначених проблем.

Під функціональною стійкістю розглянутої організаційно-технічної системи розумітимемо її властивість зберігати протягом заданого часу виконання своїх основних функцій в межах, встановлених нормативними вимогами, що забезпечить виконання функціонала (1). Особливо важливим є управління в умовах змін властивостей об'єкта управління або системи управління, що здійснюється в реальному масштабі часу, в експлуатаційних режимах об'єкта управління.

До властивостей функціональної стійкості групи належать: надійність керування, структурна компактність, ступінь централізованості та живучість групи, стабілізація взаємного положення безпілотних апаратів у групі, надійність реконфігурації та топології групи, надійність пропускної здатності каналу управління.

Отже, науково-технічна проблема, яка розглядається в дослідженні, полягає у розробленні методології синтезу управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів під час виконання колективних дій за наявності

нерегулярних збурень та завад для завдання управління за мінімального часу на прийняття рішення є актуальною.

Висновки до розділу 1

1. Обґрунтовано доцільність застосування багатопозиційної системи автономних повітряних об'єктів, визначено типові завдання, показники ефективності та розв'язано проблеми між вимогами до завдань групового управління розподіленими у просторі і часі повітряними об'єктами та можливостями науково-методичного апарату (моделей, методів, інформаційних технологій) та сучасної практики автоматизованого групового управління БПЛА щоб забезпечити функціонально стійке управління під час виконання завдань.

2. Проведений аналіз точності управління груповим польотом БПЛА засвідчує доцільність використання як вимірювач положення апаратів у групі трилатераційну систему, яка дає змогу зі спрощеним складом бортового обладнання виконувати групові польоти в зімкнутих порядках, забезпечуючи водночас високу точність виходу групи в заданий район місцевості і високу гнучкість під час виконання завдань оперативного управління групою.

3. Під час оцінювання необхідної якості стабілізації взаємного положення безпілотних апаратів у групі встановлено, що в умовах виникнення відмов інформаційного каналу, що призводять до збільшення періоду поновлення сигналів про стан апаратів у групі, необхідно забезпечити функціональну стійкість групового управління. Недостатня функціональна стійкість управління груповим рухом БПЛА в зімкнутих порядках в умовах можливості відмов інформаційного каналу може привести до недопустимого погіршення якості стабілізації апаратів у групі і навіть до зіткнення БПЛА в повітрі.

4. Удосконалено формальну постановку завдання оптимального групового управління, яка відрізняється від відомої залежно від інформаційних та енергетичних закономірностей і обмежень, які проявляються під час створення реальних систем управління.

5. На підставі проведеного аналізу наявних підходів до планування групових дій рухомих об'єктів показано, що дослідження в цій області проводяться у двох напрямках: незалежна і спільна маршрутизації. Однак, методи як незалежної, так і спільної маршрутизації мають низку недоліків, серед яких найсуттєвішими є:

- невисока швидкодія, що обмежує їх застосування в реальному часі;
- неврахування динамічних властивостей об'єкта управління;
- складність або неможливість організації взаємодопомоги об'єктів, що входять у групу.

6. За результатами аналізу стану питань групового управління визначено узагальнені вимоги до розроблюваної системи планування групових дій. Вони полягають у високій швидкодії, обліку динамічних властивостей об'єкта управління, автономності від участі наземного оператора, самонавчання.

Список використаних джерел до розділу 1

1. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Моделювання поздовжнього руху в задачах групового керування безпілотними літальними апаратами. XIX Міжнар. конф. з автоматичного управління «Автоматика / AVTOMATICS – 2012». Київ: НУХТ. 2012. С. 322.

2. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Математична модель колективного впорядкованого руху БПЛА. V Міжнар. наук-практ. конф. «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (ПРТК-2012). Київ: НАУ. 15–16 травня 2012 р. С. 66–68.

3. Brian L. Stevens, Frank L. Lewis, Eric N. Johnson. Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Controls Design, and Autonomous Systems. John Wiley and Sons Ltd. 2016. P. 768.

4. Dorri A., Kanhere S.S. and JURDAK R. Multi-Agent Systems: A Survey, IEEE Access, Vol. 6, 2018, pp. 28573–28593. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2831228.

5. Vallejo D., Castro-Schez J.J., Glez-Morcillo C., Albusac J. Multi-agent architecture for information retrieval and intelligent monitoring by UAVs in known environments affected by catastrophes. *Engineering Applications of Artificial*

Intelligence. URL: Vol. 87, 2020, 103243. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103243>.

6. Wang K., Yuan B., Zhao M. & Lu Y. Cooperative route planning for the drone and truck in delivery services: A bi-objective optimisation approach, *Journal of the Operational Research Society*. Vol. 71, Issue 10, 2020. P. 1657–1674. DOI:10.1080/01605682.2019.1621671.

7. Liua H., Menga Q., Pengc F., Lewisd F. L. Heterogeneous Formation Control of Multiple UAVs with Limited-Input Leader via Reinforcement Learning, *Neurocomputing*. Vol. 412, 2020. P. 63–71, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.06.040>.

8. Wang B. *et al.*, Graph-Based File Dispatching Protocol With D2D-Enhanced UAV-NOMA Communications in Large-Scale Networks, in *IEEE Internet of Things Journal*. Vol. 7. No. 9, pp. 8615–8630, Sept. 2020. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2994549.

9. Maw A. A, Tyan M., Nguyen T.A., Lee J-W. iADA*-RL: Anytime Graph-Based Path Planning with Deep Reinforcement Learning for an Autonomous UAV. *Applied Sciences*. 2021; 11(9):3948. URL: <https://doi.org/10.3390/app11093948>.

10. Kada B., Khalid M. and Shaikh M. S. Distributed cooperative control of autonomous multi-agent UAV systems using smooth control, in *Journal of Systems Engineering and Electronics*. Vol. 31, No. 6, pp. 1297–1307. Dec. 2020. DOI: 10.23919/JSEE.2020.000100.

11. Wang Y., Cheng Z. and Xiao M. UAVs' Formation Keeping Control Based on Multi-Agent System Consensus, in *IEEE Access*. Vol. 8, pp. 49000–49012, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2979996.

12. Hao Y., Pan S., Qiao Y. and Cheng D. Cooperative Control via Congestion Game Approach / *IEEE Transactions On Automatic Control*, 9 April 2018, URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8334284/>.

13. Ślădkowski A., W.Kamiński Cases on Modern Computer Systems in Aviation Chapter 3 Using Unmanned Aerial Vehicles to Solve Some Civil Problems International Publisher of Progressive Information Science and Technology Research, USA, Pennsylvania, 2019.

14. Tenedório A., R. Estanqueiro, C. Delgado Henriques. *Methods and Applications of Geospatial Technology in Sustainable Urbanism*. International Publisher of Progressive Information Science and Technology Research, USA, Pennsylvania: IGI Global. 2021. 684 p.

15. Unmanned Aviation Bulletin, ICAO, 2020. URL: <https://www.icao.int/safety/UA/Documents/ICAO%20UA%20Bulletin%202020%201a.pdf>.

16. C4ISR Solutions for Unmanned Aircraft Systems (UAS). URL: <https://cartenav.com/unmanned-aircraft-systems-uas>: 17.07.2023.

17. Shmelova T., Yatsko M., Sierostanov I., Collaborative decision making (CDM) in emergency caused by captain incapacitation: deterministic and stochastic modelling. *International Journal of Decision Support System & Technology (IJDSSST)*, IGI Global. Vol. 15(1), pp. 1–27, 2023. URL: <https://ideas.repec.org/a/igg/jdsst0/v15y2023i1p1-27.html>.

18. Козуб А. М. Методика обґрунтування комплексу засобів моніторингу лісових пожеж. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2014. №4 (211). С. 194–199.

19. Козуб А. М. Оцінка бойових можливостей з радіоподавлення супутникового зв'язку з використанням БПЛА постановки перешкод в операціях. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського. 2014. № 3 (21). С. 23–26. DOI: 10.33099/2311-7249/2014-0-3(21)-23-26.

20. Заклевський Д. Є., Зуйко В. В., Козуб А. М. Методика оцінювання стійкості структури системи супутникового зв'язку: Зб. наук. пр. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Київ: ЦНДІ Н і У. 2011. Вип. 4 (20). С. 279–283.

21. Козуб А. М., Шумейко В. О., Мосійчук Д. І. Взаємодія безпілотних авіаційних систем для виконання завдань спостереження та ураження: Зб. мат. VI Міжн. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» 23 травня 2023 року. Київ: Національний університет оборони України, 2023. С. 104–106.

22. Зуйко В. В., Козуб А. М., Павлунько М. Я. Взаємодія космічних систем та безпілотних авіаційних космічних систем для виконання завдань розвідки та

ураження. Зб. мат. IV Міжн. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони» 10 квітня 2019 року. Київ: Національний університет оборони України, 2019. С. 54.

23. Мосов С. П. Аерокосмічна розвідка у сучасних військових конфліктах: монографія. Київ: Румб, 2008. 160 с.

24. Telli K., et al. A Comprehensive Review of Recent Research Trends on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) (2023) Systems, 11 (8), art. No. 400. DOI: 10.3390/systems11080400. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85169113219&doi=10.3390%2fsystems11080400&partnerID=40&md5=9d5009a02c1eaec0ff29c71b0d55bbea>.

25. Варламов І. Д., Козуб А. М., Шумейко В. О. Аналіз технологій застосування Україною даних космічного і повітряного спостереження Збройними Силами України: Мат. наук-практ. конф. *Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи*, 4 жовтня 2017 р. Київ: Національний центр управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України, 2017. С. 84–86.

26. Артюшин Л. М., Кононов О. А., Герасименко В. В., Наусенко Б. Ю. Метод вибору варіанта реалізації групового застосування безпілотних літальних апаратів. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Київ: НУОУ, 2022. № 1(43). С. 48–59. DOI: 10.33099/2311-7249/2022-44-2-10-20.

27. Козуб А. М., Шумейко В. О., Зуйко В. В., Ніколаєнко О.Є. Аналіз досвіду використання космічних систем та безпілотних авіаційних комплексів в сучасних локальних конфліктах та перспективи їх розвитку. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського. 2018. № 3 (33). С. 53–60. DOI: 10.33099/2311-7249/2018-33-3-53-60.

28. Kuchеров D. P., Kozub A. M., Dzhafarzade R. M. Bepilotnyie letatelnyie apparaty pri vyipolnenii kollektivnyih deystviy. МАА. Elmi Məcmuələr. 2014. Cild 16. № 1. S. 1–8.

29. Зуйко В. В., Козуб А. М., Михалевич В. Е. Сучасний стан та тенденції розвитку космічних систем дистанційного зондування Землі провідних країн світу.

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України. 2015. № 2 (6). С. 51–60.

30. Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R. L., Stein C. Introduction to Algorithms. *Second edition*. The MIT Press. Cambridge, Massachussets. 2003. P. 1156.

31. Mirzoyan L.A. Comparizon and improvement of methods to solving the problem of optimal flight routing. Collection of reports ICAS-2004, 24th International Congress of Aeronautical Sciences, 2004, 10 с.

32. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Планування маршруту БПЛА. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2013. № 5 (194). С. 189–192.

33. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Інтеграційний підхід до завдання вибору маршруту групи БПЛА. *Штучний інтелект*. № 4 (62). 2013. С. 333–343.

34. Дихтяренко В. Н., Кучеров Д. П., Козуб А. М. Алгоритм налаштування вагових коефіцієнтів нейроконтролера при керуванні динамічними об'єктами. *Науковий вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2014. № 2 (14Е). С. 27–35.

35. Kirkpatrick S., Gellant C. D., Vecchi M.P. Optimization by simulated annealing. *Science*. 1983. Vol. 220, pp. 671–680.

36. Song C., Lee K., Lee W.D. Extented simulated annealing for augmented TSP and multi-salesmen TSP. *Proceedings of the International joint conference on neural networks*. 2003. Vol. 3, pp. 2340–2343.

37. Goldstein M. Self organizing feature maps for the multiple travelling salesmen problem. In *Proc. Innc'90, Int. Neural Networks Conf.* 1. Vol. I, pages 258–261, Dordrecht, Netherlands, 1990. In Proc. INNC'90 Paris).

38. Medares A., Somhom S. & Enkawa T. A self-organizing neural network approach for multiple traveling salesman and vehicle routing problems. *International Transactions in Operational Research (ITOR)*. 1999. Vol. 6, pp. 591–606.

39. Torki A., Somhon S., Enkawa T. A competitive neural network algorithm for solving Vehicle routing problem. *Computers and Industrial Engineering*. 1997. Vol. 33. № 3–4, pp. 473–479.

40. Wacholder E., Han J., Mann R.C. An Extension of the Hopfield-Tank Model for Solution of the Multiple TSP, *Neural Networks for Combinatorial Optimization. Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN)*. 1991. Vol. 2, pp. 305–325.

41. Somhotn S., Modares A., Enkawa T. Competition-based neural network for the multiple traveling salesmen problem with minmax objective. *Computers and Operations Research*. 1999. Vol. 26. № 4, pp. 395–407.

42. Tsu C., Tsai M., Chen W. A study of feature-mapped approach to the multiple travelling salesmen problem. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. 1991. Vol. 3, pp. 1589–1592.

43. Zhang T., Gruver W. A., Smith M. H. Team scheduling by genetic search. *Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials*. 1999. Vol. 2, pp. 839–844.

44. Yu Z., Jinbay L., Guochang G., Rubo Z., Haiyan Y. An implementation of evolutionary computation for path planning of cooperative mobile robots. *Proceeding of the fourth world congress on intelligent and automation*, 2002. Vol. 3, pp. 1798–1802.

45. Malmborg C. A genetic algorithm for service level based vehicle scheduling. *European Journal of Operational Research*, 1996. Vol. 93, № 1, pp. 121–134.

46. Tang L., Liu J., Rong A. and Yang Z. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling schedule sn Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex. *European Journal of Operational Research*, 2000. Vol. 124. № 2, pp. 267–282.

47. Marqués Pascual, Da Ronch Andrea. Advanced UAV Aerodynamics, Flight Stability and Control: Novel Concepts, *Theory and Applications*. John Wiley & Sons Ltd. 2017. 667 p. DOI:10.1002/9781118928691.

48. William S. Levine. *The Control Handbook. Second edition*. CRC Press. 2011. 3526 p. ISBN 9781420073669.

49. Артющин Л. М., Машков О. А., Сівов М. С. Теорія автоматичного керування. Київ: КІВПС, 1996. 686 с.

50. Безпілотні літальні апарати: Методики наближених розрахунків основних параметрів та характеристик / В. М. Іллюшко та ін. Під заг. ред. В. І. Силкова. Київ: ЦНДІ ОБТ ЗС України, 2009. 302 с.

51. Shashkina K. M., Devitt D. V. Sistema gruppovogo upravleniya bpla dlya resheniya zadachi postroeniya i uderzhaniya formatsiy v polete [UAV group control system for solving the problem of building and holding formations in flight]. *Modern Science*. 2021. No. 6–2, pp. 402–406.

52. Terenyk D., Kharchenko V. Choosing strategies for deployment and ensuring the reliability of a UAV swarm to support communications in destruction conditions. *Innov. Technol. Sci. Solutions Indust.* 2024. Vol. 3. № 29. P. 91–103.

53. Park C. et al. Formation flight of multiple uavs via onboard sensor information sharing. *Sensors*. 2015. Vol. 15. No. 7. P. 17397–17419.

54. Квасніков В. П., Немченко В. В. Підсистема обробки інформації в структурі мобільного робота. *Системи обробки інформації*: зб. наук. пр. Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. 3-тє вид. Харків, 2015. С. 13–16.

55. Kuchеров D., Ogirko I., Ogirko O. Control of Information Stream for Group of UAVs in Conditions Lost Packages or Overloading, in book *Cases on Modern Computer Systems in Aviation*. By T. Shmelova, Yu. Sikirda, N. Rizun and D. Kuchеров. April, 2019, p. 128–146. URL: <https://www.igi-global.com/book/cases-modern-computer-systems-aviation/208189>.

56. Nikolos I. K., Valavanis K. P., Tsourveloudis N. C., Kostaras A. N. Evolutionary algorithm based offline/online path planner for UAV navigation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*. 2003. Vol. 33. № 6. P. 898–912.

57. Unmanned Systems Integrated Roadmap FY2011-2036. Approved for Open Publication. Reference Number: 11-S-3613, January, 2014, 108 p.

58. Sairoel Amertet, Girma Gebresenbet, Hassan Mohammed Alwan. Modeling of Unmanned Aerial Vehicles for Smart Agriculture Systems Using Hybrid Fuzzy PID Controllers. *Applied Sciences*, 2024, 14 (8):28. pp. 2–27. DOI: 10.3390/app14083458.

59. Madaline A. Dziuk, Jamshidi Mo. Fuzzy logic controlled UAV autopilot using C-Mean clustering. 6th International Conference on System of Systems Engineering, 27–30 June, 2011. DOI: 10.1109/SYSOSE.2011.5966615.

60. Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A. Operator Training for Unmanned Aerial Vehicles Control in 2019 IEEE 5th International Conference *Actual Problems of*

Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), 22–24 Oct., Kiev, Ukraine, 1–4, 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943918>.

61. Методологія формування інтелектуальної складової агентної системи рою безпілотних літальних апаратів: монографія / О. К. Погудіна та ін. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». Харків: Мадрид, 2021. 211 с.

62. Інформаційна підтримка процесів розроблення виробів безпілотної авіаційної техніки: монографія / Є. А. Дружинін та ін. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». Харків : Точка, 2016. 155 с.

63. Шалигін А. А. та ін. Підвищення точності автономної навігації невеликих безпілотних літальних апаратів за рахунок врахування вітру та похибок сенсорів. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2022. № 3 (48). С. 44–50. URL: <https://doi.org/10.30748/nitps.2022.48.05>.

64. Komar M., Volkov O. & Makhlin O. Dynamic motion model of an unmanned aerial vehicle for control and navigation tasks. *Science-Based Technologies*. 2026 68 (4), 571–580. URL: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.68.20451>.

65. Розробка базової моделі сімейства багатоцільових безпілотних авіаційних комплексів оперативно-тактичного класу: монографія / Є. А. Дружинін та ін. Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». Харків : Факт, 2020. - 256 с.

66. Valavanis Kimon P., Vachtsevanos George J. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer Netherlands. 2014. 3022 p.

67. Gandhi D., Pinto L., Gupta A. Learning to fly by crashing. *IROS : 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vancouver, BC, 24–27 September 2017. 2017. P. 4110–4123. DOI: 10.1109/iros.2017.8206247.

68. Харченко В. П., Чепіженко В. І., Павлова С. В., Тунік А. А. Авіоніка безпілотних літальних апаратів: монографія. Київ: ТОВ «Абрис-принт», 2012. 484 с.

69. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J. & Staroswiecki M. *Diagnosis and Fault-tolerant Control*, 3rd Edition. (3. edition ed.) Springer. 2015. 689 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47943-8>.

70. Креденцер Б. П. Оптимізація надмірності у складних технічних системах. Основні питання теорії та практики надійності / Б. П. Креденцер. Мінськ: Наука та техніка, 1982. 674 с.

71. Креденцер Б. П. Моделі технічного обслуговування систем з надмірністю / Б. П. Креденцер, С.В. Ленков, М.І. Резніков, В.В. Зубарєв; за ред. Б.П. Креденцер. Київ: Фенікс, 2002. 192 с.

72. Машков О. А., Кононов О. А. Можливості забезпечення функціональної стійкості ергатичних систем керування в рамках існуючого методичного апарату: Зб. наук. пр. Ін-ту проблем моделювання в енергетиці НАН України. 2006. Вип. 32. С. 151–157.

73. Машков О. А., Барабаш О. В. Топологічні критерії та показники функціональної стійкості складних ієрархічних систем. *Моделювання та інформаційні технології*: зб. наук. пр. ПІМЕ НАН України. 2003. Вип. 25. С. 29–35.

74. Неділько С. М., Баранов Г. Л. Технологічні основи забезпечення функціональної стійкості складних технічних систем за рахунок використання існуючої надмірності. *Системи озброєння і військової техніки*. 2011. № 4 (22). С. 34–39.

75. Забезпечення функціональної стійкості складних технічних систем / О.В. Барабаш, Б.В. Дурняк, О.А. Машков, Д.М. Обідін. *Моделювання та інформаційні технології*: Зб. наук. пр. – Київ: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2012. Вип. 64. С. 36–41.

76. Великі технічні системи: проектування та управління / Л. М. Артюшин, Ю. К. Зіатдінов, І. А. Попов, А. В. Харченко; За ред. І. А. Попова. Харків: Факт, 1997. 284 с.

77. Неділько С. М. Концепція забезпечення функціональної стійкості складних технічних систем на прикладі системи управління повітряним рухом України. *Системи навігації і управління*. 2011. № 3. С. 24–30.

78. Гостєв В. І., Машков О. А., Машков В. А. Способи забезпечення стійкості до відмови бортових обчислювальних систем на основі їх самоконтролю. *Кібернетика та обчислювальна техніка*. 1997. Вип. 109. С. 38–51.

79. Кравченко Ю. В., Барабаш О. В. Функціональна стійкість – властивість складних технічних систем. *Труди академії*. Київ: НАОУ, 2002. № 40. С. 225–228.

80. Kuchеров D. P., Kozub A. M. *Metodyi sinteza adaptivnyih sistem terminalnogo upravleniya*. Saarbrücken, Deutschland LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 325 p.

81. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Термінальне керування динамічною системою третього порядку в умовах обмежених збурень. *Вісник інженерної академії України*. 2013. № 3–4. С. 95–99.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ПАРАМЕТРІВ

Сучасні дослідження в області застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) орієнтовані на пошук можливостей колективного їх використання. Такі дослідження нині спрямовані на оборонну галузь, попередження і ліквідацію наслідків техногенних катастроф та аварій, а також можуть бути використані для пошукових або транспортних завдань.

Питання колективного дистанційного керування машинами (роботами) у всіх галузях життєдіяльності людини (земля, вода, космос, надра землі) перебувають в полі зору вчених економічно розвинених держав, а щорічне зростання кількості публікацій у періодичних вітчизняних виданнях і виданнях ближнього і далекого зарубіжжя в цій царині досліджень свідчить про актуальність обговорюваних питань.

Завдання для групи дистанційно керованих роботизованих засобів ставиться оператором, яке може бути виконано узгоджено, децентралізовано або ж зовсім орієнтовано на одночасне виконання різних завдань. Отже, типова структура групового управління роботизованих засобів повинна мати єдиний пульти керування з можливістю постановки завдань окремим засобам і відображення їх діяльності. Пульти, відповідно, повинен налаштувати комп'ютерну систему, яка має власне програмне забезпечення, сумісне з наявними операційними системами. Роботизований засіб, своєю чергою, також забезпечується засобами зв'язку, орієнтування та навігації, виконавчими пристроями. Передбачається, що програмне забезпечення буде в змозі забезпечити характеристики точності і часу виконання поставлених груп завдань.

У разі децентралізованого управління система керування роботизованим засобом повинна будуватися як система з елементами штучного інтелекту, що дає змогу ставити завдання власним виконавчим органам і контролювати її виконання.

Звідси випливає, що кожен елемент групи повинен мати ієрархічну систему керування, що складається щонайменше з двох рівнів управління. Верхній рівень відповідає за прийняття рішень на виконання завдань, а нижній рівень, своєю чергою, відповідає за якість виконуваних завдань.

Існують певні відмінності в умовах застосування повітряних і наземних апаратів, які полягають у керованості і способах доставлення роботизованих засобів у пункт призначення, корисного навантаження апарата, а також контролю за їх подальшими діями.

У розділі розглянуто питання моделювання технічного використання такої групи, а також оцінювання її показників технічної ефективності, пов'язаних з продуктивністю і живучістю використовуваних засобів.

2.1. Квадрокоптерна модель БПЛА

Сьогодні квадатор є найпоширенішим безпілотним літальним апаратом (БПЛА). Про це свідчать численні публікації. Такий інтерес до квадрокоптерів зумовлений їх маневреними характеристиками, які перевищують аналогічні характеристики пілотованих літаків. Безпілотні літальні апарати цього типу здатні здійснювати пересування і різко змінювати напрямок польоту, що має величезні переваги під час польоту в умовах стаціонарних і рухливих перешкод.

Отримання адекватних математичних моделей і ефективних характеристик маневреності є основними цілями більшості досліджень. Основою для отримання математичної моделі квадатора є модель гелікоптера. Оцінювання динамічних властивостей квадатора спочатку ґрунтувалося на виборі параметрів передавальної функції сервоприводів для керування швидкістю квадаторних гвинтів, наприклад, як у авторів праці [1]. Незважаючи на складність процедури, можна отримати адекватну математичну модель, використовуючи класичні методи. У роботі [2] було запропоновано математичну модель і закон управління за кутовими координатами, які забезпечують стабілізацію руху БПЛА за кутами крену та тангажа з використанням критерію Ляпунова. Метод вимагає ретельного

вибору параметрів моделі для забезпечення його стабільності. У роботах [3, 4] управління здійснюється за допомогою техніки зворотного ходу, що дає змогу стабілізувати кутові координати безпілотного літака в кінцевий час.

У роботі [5] наведено розв'язок задачі для оптимального керування кутовими координатами на основі синтезу лінійно квадратичного регулятора без шуму за допомогою квадратичного критерію. Розроблення робастного ПІД-контролера для квадаторного керування було запропоновано в [6, 7].

Подальше підвищення надійності системи можна досягти за допомогою результатів, наведених у [8]. Контроль за кінцевим часом за допомогою застосування багатфакторного super-twisting-like (супер-скручувального подібного) алгоритму було розглянуто в роботі [9]. Особливістю цього закону управління є використання розривної інтегральної складової, що допомогло уникнути впливу порушень на пристрій.

Реалізація потенційних можливостей для управління кутовими координатами моделі БПЛА квадрокоптерного типу полягає у використанні закону часово-оптимального керування (наприклад, за принципом максимуму Понтрягіна, квадратичний функціонал з обмеженням на час тощо). Наступну проблему можна розв'язати реалізацією закону про управління перемиканням, як це було запропоновано в книзі відомих американських учених Атана і Фалба [10].

Алгоритм і адаптивний закон управління літального апарату, що працює в площині крену за наявності шуму в координатних каналах вимірювання, наведено в праці [11]. У цьому разі математична модель динамічного об'єкта описується системою диференціальних рівнянь. Схему реалізації вищезазначеного закону в ручному режимі управління у двох перпендикулярних площинах, таких як тангаж і крен, представлена Athans і Falb. Слід зазначити про складність зображення лінії перемикання в замкнутому вигляді в [10].

Для вибору моделі дослідження проведено порівняльну характеристику квадаторної та гелікоптерної моделей, яка наведена в табл. 2.1. За результатами аналізу вибрано квадрокоптерну модель для дослідження групового руху БПЛА (використання в роях).

Табл. 2.1 – Порівняння характеристики квадрокоптерної та гелікоптерної моделей

Характеристика	Квадроторна / Квадрокоптерна модель	Гелікоптерна модель
Кількість гвинтів	4	1 великий + 1 маленький (хвостовий)
Складність управління	Простіше	Складніше
Маневреність	Дуже висока	Висока, але інша
Ефективність (час польоту)	Середня	Зазвичай вища
Стабільність у повітрі	Добра	Добра, але чутлива до пошкоджень
Складність технічного обслуговування	Простіше	Складніше
Використання в роях	Дуже добре підходить	Погано підходить

Основною метою цієї роботи є синтез закону оптимального керування часом з використанням динамічної моделі БПЛА, що являє собою систему диференціальних рівнянь з повністю відомими параметрами без шуму в каналах вимірювання контрольованих координат у площинах тангажа та крену.

Математичний опис моделі. Вважатимемо, що просторова орієнтація БПЛА може бути подана за допомогою функції узагальнених координат Лагранжа $(x, y, z, \theta, \varphi, \psi) \in R^6$. Нехай $q = (x, y, z) \in R^3$ з визначенням положення центру маси БПЛА в декартовій системі координат в інерційній системі відліку. $\xi = (\psi, \theta, \varphi)^T \in R^3$ кути Ейлера, що називаються рисканням, тангажем і креном відповідно.

Безпілотний літальний апарат є чотиримоторним літальним апаратом, двигун створює тягу f_i , $(i = \overline{1,4})$, P є обмеженим значенням, тобто $f_i \leq P$. Схема квадروتора показана на рис.2.1.

Для отримання рівнянь руху квадروتора функція Лагранжа може бути подана сумою кінетичної та потенціальної енергії динамічної системи:

$$L(\dot{q}, \dot{\xi}, t) = K(\dot{q}, \dot{\xi}, t) - U(q, t). \quad (2.1)$$

Тут $K(\dot{q}, \dot{\xi}, t)$ є кінетичною енергією літального апарата, і $q_i \equiv \frac{dq_i}{dt}$, $\xi_i \equiv \frac{d\xi_i}{dt}$, де t – час.

Цей тип енергії формується як сума трансляційних і обертальних складових,

$$K(\dot{q}, \dot{\xi}, t) = \frac{m\dot{q}^2(t)}{2} + \frac{m\dot{\xi}^2(t)}{2} \quad (2.2)$$

і

$$U(q, t) = mgz(t). \quad (2.3)$$

Рівняння динаміки можна отримати диференціюванням функції Лагранжа (2.1) щодо похідних координат і за часом, а саме:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F_i, \quad (2.4)$$

де F_i – зовнішня сила, яка діє на i -у координату q_i . Зазвичай,

$$F = m\ddot{q}; \quad (2.5)$$

де

$$\ddot{q} \equiv \frac{d^2 q}{dt^2}.$$

Вважатимемо, що ці сили здатні переміщати квадатор у задану точку траєкторії. Сила, що прикладається до входу, може розглядатися як керувальний сигнал об'єкта. Розглядаючи основний тип зміщення відповідно до рис. 2.1, можна записати

$$F = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ u \end{pmatrix}, \quad (2.6)$$

де

$$u = \sum_{i=1}^N G_i, \quad (2.7)$$

i

$$G_i = k_i \Omega_i^2. \quad (2.8)$$

У (2.7) $N = 4$ коефіцієнт k_i є деякою константою, а Ω_i – кутова швидкість i -го двигуна.

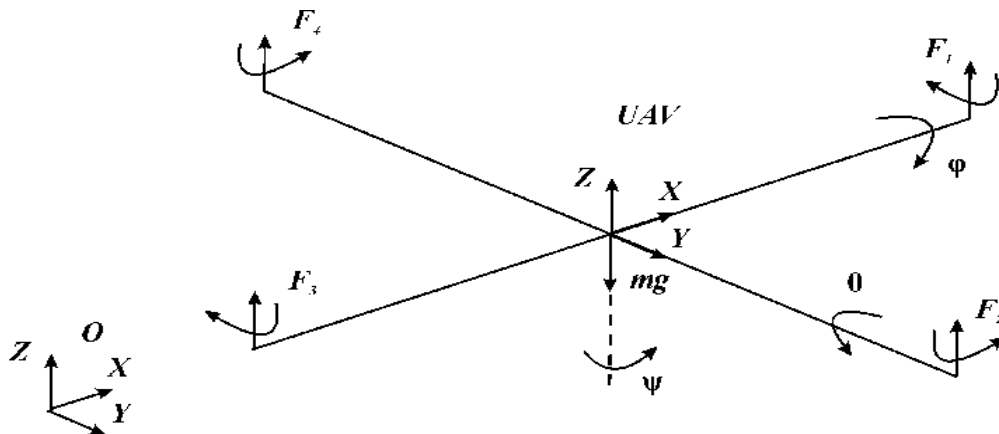


Рис. 2.1. Конфігурація чотиримоторного БПЛА з нерухомою рамою платформи та інерційною рамою XYZ

У системі Ейлерової координати орієнтація БПЛА щодо інерційної системи координат XYZ може бути продана матрицею обертання R

$$F_q = R(\psi, \theta, \varphi)F, \quad (2.9)$$

де

$$R = \begin{pmatrix} C_\psi C_\theta & C_\psi S_\theta S_\varphi - S_\psi C_\varphi & C_\psi S_\theta C_\varphi + S_\psi S_\varphi \\ S_\psi C_\theta & S_\psi S_\theta S_\varphi + C_\psi C_\varphi & S_\psi S_\theta C_\varphi - C_\psi S_\varphi \\ -S_\theta & C_\theta S_\varphi & C_\theta C_\varphi \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

Матриця (2.10) використовує позначення $C_\alpha = \cos(\alpha)$, $S_\alpha = \sin(\alpha)$. Беручи до уваги (2.10) і (2.6), можна переписати формулу (2.9) у такому вигляді

$$m\ddot{x} = u(C_\psi S_\theta C_\varphi + S_\psi S_\varphi); \quad (2.11)$$

$$m\ddot{y} = u(S_\psi S_\theta C_\varphi - C_\psi S_\varphi); \quad (2.12)$$

$$m\ddot{z} = uC_\theta C_\varphi - mg. \quad (2.13)$$

Нехай I_1, I_2, I_3 – моменти інерції квадранта відносно осей X, Y і Z , що проходять через його центр маси відповідно $(\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ – кутові швидкості відносно осей X, Y і Z . Як відомо [10, 12], якщо зовнішні сили відсутні, то диференціальні рівняння кутових швидкостей можуть бути подані у вигляді

$$I_1 \ddot{\varphi}(t) = (I_2 - I_3) \dot{\theta}(t) \dot{\psi}(t); \quad (2.14)$$

$$I_2 \ddot{\theta}(t) = (I_3 - I_1) \dot{\psi}(t) \dot{\varphi}(t); \quad (2.15)$$

$$I_3 \ddot{\psi}(t) = (I_1 - I_2) \dot{\varphi}(t) \dot{\theta}(t). \quad (2.16)$$

Рівняння (2.14)–(2.16) є динамічними рівняннями Ейлера. З огляду на дії двигунів M_1 – M_4 , рівняння (2.14)–(2.16) мають вигляд:

$$I_1 \ddot{\varphi}(t) = (I_2 - I_3) \dot{\theta}(t) \dot{\psi}(t) + cu_1(t); \quad (2.17)$$

$$I_2 \ddot{\theta}(t) = (I_3 - I_1) \dot{\psi}(t) \dot{\varphi}(t) + cu_2(t); \quad (2.18)$$

$$I_3 \ddot{\psi}(t) = (I_1 - I_2) \dot{\varphi}(t) \dot{\theta}(t) + u_3(t). \quad (2.19)$$

У формулах (2.17)–(2.19) c – відстань між центром маси БПЛА і мотором M_i ; u_1, u_2, u_3 – механічні сили, що виробляються двигунами M_i . Ці сили можна описати у такий спосіб

$$u_1(t) = G_4(t) - G_2(t) = k_4 \Omega_4^2(t) - k_2 \Omega_2^2(t); \quad (2.20)$$

$$u_2(t) = G_1(t) - G_3(t) = k_1\Omega_1^2(t) - k_3\Omega_3^2(t); \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} u_3(t) &= G_1(t) + G_3(t) - G_4(t) - G_2(t) \\ &= k_1\Omega_1^2(t) + k_3\Omega_3^2(t) - k_4\Omega_4^2(t) - k_2\Omega_2^2(t). \end{aligned} \quad (2.22)$$

Обертання двигунів відносно опорної рами тіла-осі призводить до ефекту Кориоліса, а саме до зміни прискорень центру мас у інерційній системі відліку. Зважаючи на цей ефект, можна записати таку систему рівнянь

$$I_1\ddot{\phi}(t) = (I_2 - I_3)\dot{\theta}(t)\dot{\psi}(t) - I_r\dot{\theta}(t) + cu_1(t); \quad (2.23)$$

$$I_2\ddot{\theta}(t) = (I_3 - I_1)\dot{\psi}(t)\dot{\phi}(t) + I_r\dot{\phi}(t)\Omega + cu_2(t); \quad (2.24)$$

$$I_3\ddot{\psi}(t) = (I_1 - I_2)\dot{\phi}(t)\dot{\theta}(t) + u_3(t). \quad (2.25)$$

Отже, наша мета – синтезувати закон управління, який забезпечує переміщення квадрантора з однієї точки в іншу в 3D просторі.

Синтез закону управління. Для синтезу закону керування необхідно проаналізувати рівняння (2.23)–(2.25). Оскільки вісь Z є віссю симетрії, а двигуни M_i однакові і жорстко закріплені на апараті, моменти інерції I_1 і I_2 дорівнюють один одному, тобто

$$I_1 = I_2 = I. \quad (2.26)$$

Тоді рівняння руху (2.23)–(2.25) можна звести до вигляду

$$\ddot{\phi}(t) = \frac{1}{I}[(I - I_3)\dot{\theta}(t)\dot{\psi}(t) - I_r\dot{\theta}(t) + cu_1(t)]; \quad (2.27)$$

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{1}{I}[-(I - I_3)\dot{\psi}(t)\dot{\phi}(t) + I_r\dot{\phi}(t)\Omega + cu_2(t)]; \quad (2.28)$$

$$\ddot{\psi}(t) = \frac{1}{I} u_3(t). \quad (2.29)$$

Дослідження цих рівнянь доводить, що якщо тяга u_3 і початкові стани $\varphi(0)$, $\theta(0)$, $\psi(0)$ відомі в момент часу $t = 0$, завжди можна знайти координату $\psi(t)$ подвійною інтеграцією

$$\psi(t) = \psi(0) + \frac{1}{I} \iint u_3 dt^2, \quad (2.30)$$

яка незалежна від кутових координат $\varphi(t)$, $\theta(t)$. Стабілізація координат ψ можлива за кутових швидкостей, $\dot{\varphi}(t)$, $\dot{\theta}(t)$, якщо кутові швидкості набувають нульових значень за мінімально можливий час, а рівність $u_3(t) = \text{const}$ забезпечується, звідки $\psi(t) = \Psi = \text{const}$. Вважатимемо, що тяги $u_1(t)$, $u_2(t)$ обмежені амплітудою

$$|u_1(t)| \leq \bar{u}_1 = U, |u_2(t)| \leq \bar{u}_2 = U.$$

Наведемо нові позначення

$$\omega = \frac{I - I_3}{I} \dot{\psi}, \Phi = \dot{\varphi}, \Theta = \dot{\theta}, l = \frac{c}{I},$$

і підставивши ці значення в рівняння (2.27)–(2.29), отримаємо

$$\dot{\Phi}(t) = \omega \Theta(t) - \frac{l_r}{I} \Theta(t) \Omega + l \bar{u}_1(t) = \omega' \theta(t) + l \bar{u}_1(t); \quad (2.31)$$

$$\dot{\Theta}(t) = -\omega \Phi(t) - \frac{l_r}{I} \Phi(t) \Omega + l \bar{u}_2(t) = \omega' \Phi(t) + l \bar{u}_2(t). \quad (2.32)$$

У рівняннях (2.11)–(2.13) також використовуємо $|u_3(t)| \leq \bar{u}_3$, і $x_1 = \dot{x}$, $x_2 = \dot{y}$, $x_3 = \dot{z}$. Тоді рівняння (2.11)–(2.13) приймають вигляд

$$\dot{x}_1 = \bar{u}_3(C_\psi S_\theta C_\varphi + S_\psi S_\varphi)/m ; \quad (2.33)$$

$$\dot{x}_2 = \bar{u}_3(S_\psi S_\theta C_\varphi - C_\psi S_\varphi)/m ; \quad (2.34)$$

$$\dot{x}_3 = \bar{u}_3 C_\theta C_\varphi / m - g . \quad (2.35)$$

Унаслідок перетворень отримаємо систему рівнянь у просторі станів з вектором стану $\{v\} \in \mathbb{R}^{12}$, $v = (x_1, x_2, x_3, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \varphi, \theta, \psi, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})^T$. Динамічний об'єкт реалізовує рух у цьому просторі від початкового стану

$$v(0) = (x_1(0), x_2(0), x_3(0), 0, 0, 0, \varphi(0), \theta(0), \psi(0), 0, 0, \psi)^T$$

до кінцевого стану

$$v(0) = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \psi)^T.$$

З керувальними діями $|\bar{u}_1(t)| \leq U, |\bar{u}_2(t)| \leq U, |\bar{u}_3(t)| \leq U'$ для будь-якого моменту часу t .

Керувальну дію для динамічної системи (2.31), (2.32) можна отримати, синтезуючи алгоритми оптимального керування часом.

У цьому разі завдання управління полягає в мінімізації станів $\Phi(t)$, $\Theta(t)$ за мінімальний час і станів x_1, x_2, x_3 , повністю визначених кутами φ, θ, ψ , і керувальним входом U' . Потім просторові кутові швидкості поділяються на чотири підпростори

$$S_1 = \{u_1(t) = U, u_2(t) = U\} ; \quad (2.36)$$

$$S_2 = \{u_1(t) = U, u_2(t) = -U\} ; \quad (2.37)$$

$$S_3 = \{u_1(t) = -U, u_2(t) = U\}; \quad (2.38)$$

$$S_4 = \{u_1(t) = -U, u_2(t) = -U\}. \quad (2.39)$$

Перемикання знака управління здійснюється відповідно до кривої

$$\mathfrak{S} \equiv [\cup_{j=0}^{\infty} \mathfrak{S}_{S_1}^j(\cdot)] \cup [\cup_{j=0}^{\infty} \mathfrak{S}_{S_2}^j(\cdot)] \cup [\cup_{j=0}^{\infty} \mathfrak{S}_{S_3}^j(\cdot)] \cup [\cup_{j=0}^{\infty} \mathfrak{S}_{S_4}^j(\cdot)]. \quad (2.40)$$

У формулі (2.40) $\mathfrak{S}_{S_i}^j(\cdot) = \mathfrak{S}_{S_i}^j(\Phi(t), \Theta(t))$, j – число сектора кільця, що унеможливилює оптимальну траєкторію для пари ознак контролю, $j = 0, 1, \dots, N$; N – кількість перемикачів. Звідси

$$\mathfrak{S}_{S_1}^j(\cdot) \equiv \left\{ \begin{array}{l} (\Phi, \Theta) \in F_{++}: \\ \Theta = c_1 \sqrt{1 - (-c_2 \Phi + (2j + 1))^2}, \\ \Phi = c_1 \sqrt{1 - (c_2 \Phi + (2j + 1))^2}. \end{array} \right\} \quad (2.41)$$

$$\mathfrak{S}_{S_2}^j(\cdot) \equiv \left\{ \begin{array}{l} (\Phi, \Theta) \in F_{+-}: \\ \Theta = c_1 \sqrt{1 - (-c_2 \Phi + (2j + 1))^2}, \\ \Phi = -c_1 \sqrt{1 - (c_2 \Phi - (2j + 1))^2}. \end{array} \right\} \quad (2.42)$$

$$\mathfrak{S}_{S_3}^j(\cdot) \equiv \left\{ \begin{array}{l} (\Phi, \Theta) \in F_{-+}: \\ \Theta = -c_1 \sqrt{1 - (-c_2 \Phi - (2j + 1))^2}, \\ \Phi = c_1 \sqrt{1 - (c_2 \Phi + (2j + 1))^2}. \end{array} \right\} \quad (2.43)$$

$$\mathfrak{S}_{S_4}^j(\cdot) \equiv \left\{ \begin{array}{l} (\Phi, \Theta) \in F_{--}: \\ \Theta = -c_1 \sqrt{1 - (-c_2 \Phi - (2j + 1))^2}, \\ \Phi = -c_1 \sqrt{1 - (c_2 \Phi - (2j + 1))^2}. \end{array} \right\} \quad (2.44)$$

Зовнішній вигляд лінії перемикання показано на рис. 2.2.

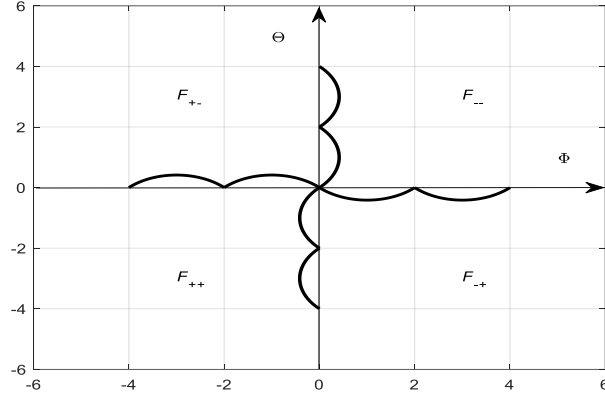


Рис. 2.2. Форма кривої перемикання

Пропозиція. Оптимальний закон керування може бути розроблений у вигляді

$$\bar{u}_1(t) = \begin{cases} +U, & \text{if } \mathfrak{I}_{S_1}^j(\cdot) > 0, \mathfrak{I}_{S_2}^j(\cdot) > 0, \\ -U, & \text{if } \mathfrak{I}_{S_3}^j(\cdot) < 0, \mathfrak{I}_{S_4}^j(\cdot) < 0, \\ \bar{u}_1(t-0), & \text{if } \mathfrak{I}_{S_1}^j(\cdot) = 0, \\ \mathfrak{I}_{S_2}^j(\cdot) = 0, \mathfrak{I}_{S_3}^j(\cdot) = 0, \mathfrak{I}_{S_4}^j(\cdot) = 0, \end{cases} \quad (2.45)$$

$$\bar{u}_2(t) = \begin{cases} +U, & \text{if } \mathfrak{I}_{S_1}^j(\cdot) > 0, \mathfrak{I}_{S_3}^j(\cdot) > 0, \\ -U, & \text{if } \mathfrak{I}_{S_2}^j(\cdot) < 0, \mathfrak{I}_{S_4}^j(\cdot) < 0, \\ \bar{u}_2(t-0), & \text{if } \mathfrak{I}_{S_1}^j(\cdot) = 0, \\ \mathfrak{I}_{S_2}^j(\cdot) = 0, \mathfrak{I}_{S_3}^j(\cdot) = 0, \mathfrak{I}_{S_4}^j(\cdot) = 0, \end{cases} \quad (2.46)$$

Наслідок 1. Якщо $\Theta(t) = 0$, $\Phi(t) = 0$, $t \neq 0$, це кінцева точка керування, а $U(T) = 0$.

Наслідок 2. Якщо $\Theta(t) \neq 0$, $\Phi(t) \neq 0$, $t = 0$, оптимальне керування – це тип комутатора, а кількість комутацій – не більше ніж N .

Наслідок 3. Кількість комутаційних керувань динамічної системи (2.31), (2.32) згідно із законом керування (2.45), (2.46) мінімальна, і визначається $\Phi(0)$, $\Theta(0)$ відповідно

$$N_{\min} = \left\lceil \frac{\omega}{2l} \sqrt{(\Phi(0))^2 + (\Theta(0))^2} \right\rceil \quad (2.47)$$

де $[\cdot]$ – ціла частина числа.

Доведення. Аналогічно до [10, розділ 7.9] і тому пропущене.

Приклад імітації руху чотиримоторного БПЛА розглядається для початкової кутової швидкості 0,8 рад/с і 0,4 рад/с для крену та тангажа відповідно. Дія керування вважалася рівною нормованим значенням, тобто $U = \pm 1$, $\omega = 5 \text{ s}^{-1}$, $l = 1 \text{ м}$, і згідно з (2.47) мінімальна кількість комутацій знака керувального сигналу для цих початкових умов дорівнює 2. Результати тестування початкової невідповідності за алгоритмом (2.45), (2.46) з функцією розділення (2.40)–(2.44) в різних площинах наведені на рис. 2.3–2.6.

Зміна початкової невідповідності відносно кутових швидкостей $\Phi(t)$, $\Theta(t)$ у фазовій площині $\Phi\Theta$ показано на рис. 2.3.

Варіації тих самих змінних, які показані на верхньому графіку на рис. 2.4 у часовій площині, а також керувальні дії $u_1(t)$, $u_2(t)$, що забезпечують кутову стабілізацію квадрантора, показані на нижньому графіку на рисунку 2.4. Результати випробувань підтверджують початкові здогадки щодо кількості перемикального керувального сигналу.

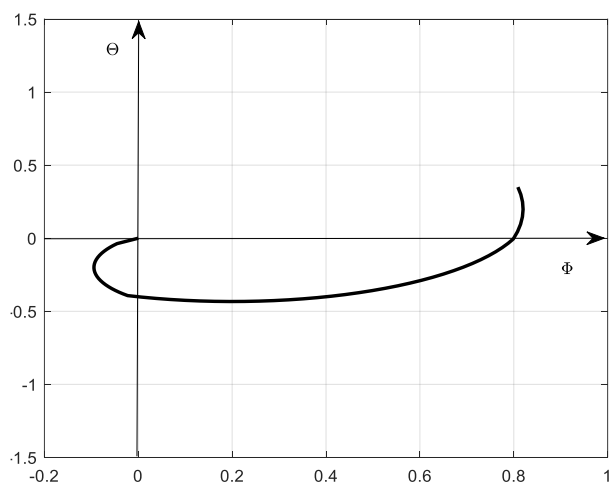
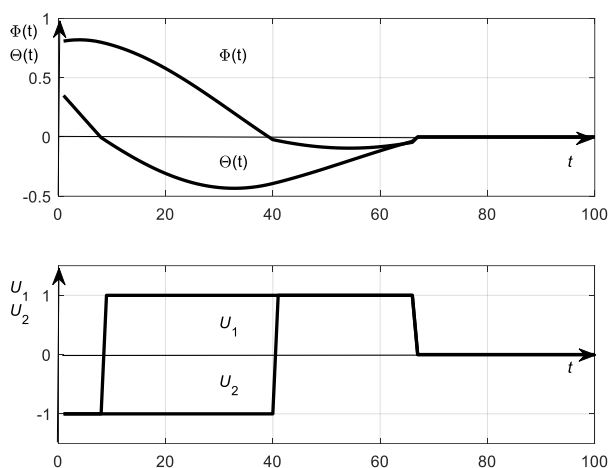
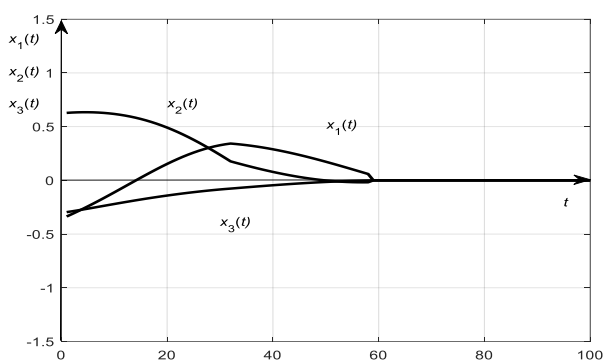
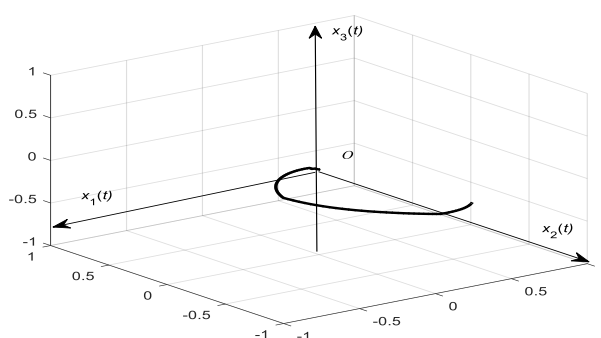


Рис. 2.3. Заміна змінних у фазовій площині Θ , Φ

Рис.2.4. Заміна змінних Φ , Θ , U_1 , U_2 у часовій площині

На рис. 2.5, 2.6 показано зміни координат $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ у часовій та у фазовій площинах відповідно.

Рис. 2.5. Заміна змінних $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ у часовій площиніРис. 2.6. Заміна змінних $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ у фазовій площині

Закон керування було досліджено за допомогою програмного пакету MatLab для різних початкових невідповідностей при $\psi = 30^\circ$. Ці результати наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Деякі результати дослідження

θ , рад	φ , рад	N	Θ , рад/с	Φ , рад/с	$x_1(t)$, м	$x_2(t)$, м	$x_3(t)$, м
0	0,08	1	-0,0198	0,0495	0,0076	-0,0529	-0,0014
0,05	0,1	1	0,039	-0,0397	0,014	0,054	-0,0015
0,1	0,12	1	0,0475	-0,0489	0,0168	0,0663	-0,0023
0,15	0,14	1	0,0469	-0,0441	0,0187	0,0618	-0,0021
0,2	0,16	1	0,0465	-0,0389	0,0055	0,0594	-0,0018
0,25	0,18	1	-0,0237	0,0482	0,0141	0,0644	-0,0022
0,35	0,2	1	0,041	0,0464	0,0602	-0,014	-0,0019
0,4	0,3	1	-0,0354	0,0465	-0,0156	-0,0585	-0,0018
0,45	0,4	2	-0,0428	-0,022	-0,0457	-0,0184	-0,0012
0,5	0,6	2	0,0476	0,0493	-0,046	-0,0185	-0,0012
0,55	0,8	2	0,0058	-0,0486	-0,0192	0,0452	-0,0012

Досяжна точність встановлення кутової швидкості $\sigma_\Phi = 0,0466$ рад/с, $\sigma_\Theta = 0,0422$ рад/с. Для досягнення ефекту оптимального керування за часом початкові кутові невідповідності повинні перевищувати 0,047 рад/с. У всіх випадках виконання останньої умови моделювання дало задовільні результати, тобто похибка стабілізації не перевищує $\sigma_{x_1} = 0,03$ м, $\sigma_{x_2} = 0,049$ м, $\sigma_{x_3} = 0,000413$ м.

Запропоновано алгоритм керування БПЛА типу квадروتора зі стабілізувальними кутовими координатами за допомогою оптимального за часом керування. Цей алгоритм передбачає, що основні параметри квадروتора відомі і вимірюються кутові координати руху квадروتора. На відміну від інших законів керування, запропоновано закон управління типом комутації. Основні можливості закону управління сформульовані в наслідках. Тут ми аналітично встановлюємо оптимальний для часу закон керування та залежність мінімальної кількості перемикального керувального сигналу та початкових умов динамічної системи. Процес моделювання руху БПЛА доводить правильність закону керування, який пропонується в роботі [13].

Зазначений закон про контроль ефективний за великих невідповідностей. Для невеликих розбіжностей слід застосовувати закон лінійного контролю. Завданням

майбутнього дослідження є вивчення закону керування за відсутності точних значень параметрів об'єкта управління.

2.2. Стабілізація просторового положення квадротора методом бекстепінгу

Незважаючи на значне зростання практичного застосування квадаторних БПЛА та успіхи в базовій стабілізації, проблема забезпечення ефективного та robustного керування просторовим положенням у умовах зовнішніх збурень, часткових відмов двигунів та невизначеності параметрів залишається актуальною.

Від якості системи керування залежать стійкість польоту, точність маневрування і виконання польотного завдання загалом. Розробникам систем керування квадрокоптером необхідно брати до уваги нелінійну динаміку керованого транспортного засобу, пов'язану з параметричною невизначеністю динамічного об'єкта, можливі варіанти немодельованої динаміки, а також вплив зовнішніх чинників польоту, зокрема вітру та перешкод на маршруті польоту, що загалом вимагає ефективного маневрування [14].

Система керування БПЛА, як правило, спирається на динаміку моделей другого порядку, що характеризується слабкою стійкістю та принципом зворотного зв'язку, що не дає можливості повністю виконати завдання польоту. Розробник системи керування також повинен брати до уваги обмежений простір, доступний для розміщення бортової електроніки та акумуляторної батареї. Сучасні мініатюрні електронні пристрої дають змогу реалізувати складні алгоритми управління, які можуть гарантувати безпеку всіх етапів польоту квадатора. Отже, необхідний пошук відповідних алгоритмів керування динамікою квадатора, ефективність яких підтверджена адекватним математичним моделюванням.

Нелінійність динаміки квадатора пояснюється переважно уявними коренями характеристичного рівняння, отриманого на основі його математичної моделі, що визначає складність синтезу закону керування [13]. Збільшення розмірності динамічної системи призводить до значного зростання обчислювальної

складності закону керування, крім того, він потребує додаткових обмежень при постановці завдання.

Загальний підхід до побудови математичних моделей розроблених систем керування БПЛА можна знайти в [15] та в списку використаних джерел до неї. Як відомо, динаміка польоту літальних апаратів розглянутого типу істотно нелінійна, оскільки існує взаємна залежність поздовжнього і поперечного рухів. Окрім того, цей літальний апарат чутливий до зовнішніх перешкод і має певну невизначеність щодо параметрів контрольованої установки, яку неможливо виключити.

Авторами [16]–[18] застосована схема системи керування, що реалізовує інверсну динаміку керованого об'єкта за допомогою ПД (ПД)-регулятора. Як відомо з [19], [20], ПД-регулятор потребує налаштування; високочастотні складові сигналу помилки вносять додатковий шум у канал керування; також за стрибкоподібної зміни сигналу помилки можуть виникнути керувальні імпульси великої амплітуди. У праці [21] запропоновано ідентифікацію математичної моделі БПЛА. У цьому разі оцінювання невідомих коефіцієнтів передавальних функцій знаходили методом найменших квадратів; утім шукані змінні визначаються динамікою діючої системи. Припускається наявність оптимальної системи управління в системі.

Ван і Лі [22] пропонують тривимірну візуалізацію БПЛА з чотирма поворотними гвинтами. Система керування містить блоки слідкувального диференціатора, розширеного спостерігача стану та нелінійного зворотного зв'язку за помилками. Проте інформації про якість виготовленого регулятора там немає. У [23] розглянуто систему керування, де застосовано регулятор співвідношення на основі алгоритму зворотного кроку та бажаної функції кутових прискорень, що використовується в мікромашині на кшталт кажана. Градієнтний (найкрутіший спуск) підхід використовується в системі керування БПЛА [24]–[26]. В основі лежить інтегральна диференціальна модель об'єкта керування, яка розроблена авторами та використовується в системі підтримки прийняття рішень для керування апаратом.

Метод бекстеппінгу посідає важливе місце в сучасних дослідженнях з нелінійного управління, зокрема в задачах стабілізації та траєкторного руху квадаторних БПЛА. За останні роки значна кількість публікацій присвячена розвитку адаптивних та robust варіантів бекстеппінгу для роботи в умовах зовнішніх збурень і невизначеності параметрів. (див., наприклад, [27]–[29]). Так, авторами було запропоновано історію техніки бекстеппінгу для розв’язування рівнянь за частковими похідними [30]. Порівняння трьох методів керування нелінійними об’єктами, а саме: режим стеження, метод зворотного кроку та лінеаризований зворотний зв’язок, за даними публікацій, що охоплюють великий часовий інтервал, наведено в [31]. Автори віддають перевагу першим двом методам управління, справедливо вказуючи на наявні у них недоліки, що відбувалися на практиці. На відміну від попередньої публікації, окрім розглянутих, керування на основі нечіткої логіки досліджено Nasr та ін. [29]. На жаль, перевагу тому чи іншому методу слід віддавати тільки після точного вивчення об’єкта управління та умов його експлуатації.

Слід зазначити, що параметри перехідного процесу з використанням бекстеппінг-алгоритму не завжди задовільні, і це вимагає нового пошуку рішення. Отже, автори [30], [31] були заохочені знайти найкращі параметри бекстеппінгового контролера шляхом оптимізації рою частинок. У роботі [31] методом штучної бджолиної сім’ї знайдено оптимальні параметри бекстеппінг-алгоритму, що дає змогу отримати керований процес краще, ніж за їх довільного вибору. Проте запропонована схема обчислень трудомістка. Останні публікації щодо застосування процедури зворотного кроку для забезпечення супутникової навігації та контролю мережі БПЛА були розглянуті в статтях [32]–[35] відповідно. Отже, використання передових методів контролю відповідає інтересам майбутнього використання, наприклад управління космічними мережами та мережею БПЛА.

Процедура зворотного кроку останнім часом стала популярнішою для керування електричними машинами [36]–[40]. Особливістю бекстеппінг-алгоритму в цій роботі є збільшення кандидата функції Ляпунова на дві-п’ять похідних. На жаль, параметри процедури вибираються найчастіше евристичним шляхом або

методом проб і помилок. Подібний підхід автори [41] використали для керування DC-DC понижувальним перетворювачем.

У роботах [42]–[44] фотоелемент використовується в контурі керування для виконання різноманітних завдань керування. Практичне застосування процедури зворотного кроку не відрізняється від згаданого вище методу. У роботі [44] під процедурою адаптивного зворотного кроку розуміється визначення кандидата функції Ляпунова з додатковим членом.

Аналіз наведених публікацій дає підстави стверджувати, що регулятор на основі бекстеппінгового алгоритму для квадротора становить інтерес для дослідників. Проте існує проблема вибору достатніх параметрів регулятора, яка наразі розв’язується методом проб і помилок. Відмінність квадротора від інших типів об’єктів управління полягає в необхідності просторового управління. У цьому разі динамічна установка описується великою кількістю координат: просторовими координатами та їх швидкостями, кутовими координатами та їх швидкостями, а стабілізація його просторового положення забезпечується чотирма двигунами. Ця робота є розвитком ідеї, запропонованої в [45], [46], а в поточній роботі ми вивчаємо параметри процедури зворотного кроку для типових рухів квадротора. Запропоновано новий алгоритм встановлення параметрів процедури бекстеппінгу залежно від бажаної якості контролю, який є нашим внеском у дослідження. У роботі також наведено теоретичну основу для алгоритму та аналіз результатів моделювання.

Математичний опис моделі. Діаграма квадротора, системи координат і сили, що діють на об’єкт керування, показані на рис. 2.7, де введено позначення XYZ (O -рама) – це фіксована система координат, з’єднана із Землею, $X'Y'Z'$ (БПЛА-рама) – рухома система координат, початок якої збігається з центром тяжіння БПЛА, змінні φ , θ , ψ відповідають кутам крену, тангажа та рискання в системі координат Землі, де φ , θ розміщені в інтервалі $]-\pi/2; \pi/2[$, а $\psi \in]-\pi; \pi[$.

Рівняння динаміки квадротора в 3D просторі записуються у вигляді, наведеному в підрозділі 2.1 за формулами (2.9)–(2.19).

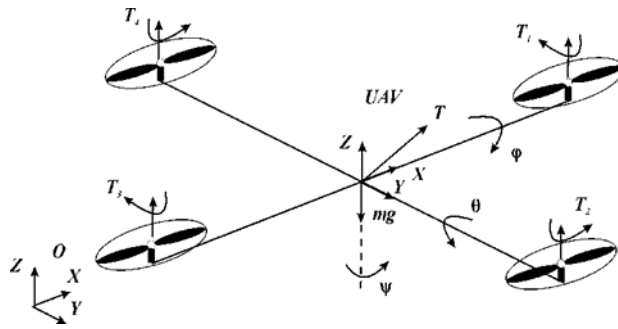


Рис. 2.7. Схема сил, що діють на квадатор у системі координат $X'Y'Z'$

Рівняння (2.14)–(2.16) є динамічними рівняннями Ейлера. З огляду на дії двигунів M_1 – M_4 , рівняння (2.14)–(2.16) мають вигляд

$$I_1 \ddot{\phi}(t) = (I_2 - I_3) \dot{\theta}(t) \dot{\psi}(t) - I_r \dot{\theta}(t) \Omega + d \bar{u}_3(t) ; \quad (2.48)$$

$$I_2 \ddot{\theta}(t) = (I_3 - I_1) \dot{\psi}(t) \dot{\phi}(t) + I_r \dot{\phi}(t) \Omega + d \bar{u}_4(t) ; \quad (2.49)$$

$$I_3 \ddot{\psi}(t) = (I_1 - I_2) \dot{\phi}(t) \dot{\theta}(t) + \bar{u}_2(t) . \quad (2.50)$$

У формулах (2.48)–(2.50) d – відстань між центром мас БПЛА та двигуном; T_i, I_r – інерція ротора; $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \bar{u}_3, \bar{u}_4$ – механічні сили, що забезпечують обертальний рух дрона. Ці сили можна описати у такий спосіб

$$\bar{u}_1 = k_1 \Omega_1^2 + k_2 \Omega_2^2 + k_3 \Omega_3^2 + k_4 \Omega_4^2 ; \quad (2.51)$$

$$\bar{u}_2 = k_1 \Omega_1^2 + k_2 \Omega_2^2 - k_3 \Omega_3^2 - k_4 \Omega_4^2 ; \quad (2.52)$$

$$\bar{u}_3 = k_4 \Omega_4^2 - k_2 \Omega_2^2 ; \quad (2.53)$$

$$\bar{u}_4 = k_1 \Omega_1^2 - k_3 \Omega_3^2 , \quad (2.54)$$

де k_i – коефіцієнт, що зв'язує момент із кутовою швидкістю Ω_i i -го двигуна в (2.51)–(2.54). Беручи до уваги ідентичність двигунів, симетричність їх розташування та жорсткість конструкції, можна встановити, що на фіксованій висоті (вісь Z) моменти I_1 та I_2 у (2.48)–(2.50) рівні (див. (2.26)).

Обертальну динаміку квадروتора за формулами (2.48)–(2.50) можна записати у вигляді

$$\ddot{\phi}(t) = \frac{1}{I} [(I - I_3)\dot{\theta}(t)\dot{\psi}(t) - I_r\dot{\theta}(t)\Omega + d\bar{u}_3(t)] ; \quad (2.55)$$

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{1}{I} [-(I - I_3)\dot{\psi}(t)\dot{\phi}(t) + I_r\dot{\phi}(t)\Omega + d\bar{u}_4(t)] ; \quad (2.56)$$

$$\ddot{\psi}(t) = \frac{1}{I} \bar{u}_2(t) . \quad (2.57)$$

За початкового стану $\psi(0)$ і знаючи момент u_3 , координату $\psi(t)$ можна розрахувати подвійним диференціюванням (2.57)

$$\psi(t) = \psi(0) + \frac{1}{I} \bar{u}_2 dt^2 , \quad (2.58)$$

що впливає з незалежності координат $\psi(t)$, $\theta(t)$.

Стабілізація координати ψ можлива, якщо кутові швидкості набувають нульових значень та забезпечується рівність $\bar{u}_2 = \text{const}$, де $\psi(t) = \Psi = \text{const}$. Введемо обмеження на моменти u_3, u_4 :

$$|u_3(t)| \leq \bar{u}_3 = U, |u_4(t)| \leq \bar{u}_4 = U.$$

Наведемо нові позначення

$$\omega = \frac{I - I_3}{I} \dot{\psi}, \Phi = \dot{\phi}, \Theta = \dot{\theta}, l = \frac{d}{I}.$$

Після підстановки виразів (2.59) у (2.56), (2.57) отримаємо

$$\dot{\Phi} = \omega\Theta - \frac{I_r}{I}\Theta\Omega + l\bar{u}_3(t) = \omega'\Theta + l\bar{u}_3 ; \quad (2.59)$$

$$\dot{\Theta} = -\omega\Phi - \frac{I_r}{I}\Phi\Omega + l\bar{u}_4 = -\omega'\Phi + l\bar{u}_4 . \quad (2.60)$$

У (2.59), (2.60) вводиться нова змінна $\omega' = \omega - \frac{l_r}{l} \Omega$. Нелінійність цієї моделі має переважно визначені обмеження елементів і їх численні входи, які можуть бути ступінчастими або гармонічними. Як видно [15], система (2.59), (2.60) має уявні корені свого характеристичного рівняння і тому має нелінійну динаміку. Тепер нашою метою є синтезувати закон керування, який забезпечить $e_\Phi \rightarrow 0$, $e_\Theta \rightarrow 0$, для $t \rightarrow \infty$ без шуму в каналах вимірювання координат БПЛА; e_Φ , e_Θ – похибки керування за кутами.

Синтез закону керування. Об'єкт керування, наведений у (2.59), (2.60), має нелінійну динаміку і може бути описаний передавальною функцією консервативного елемента другого порядку з двома уявними полюсами.

Розглянемо випадок, коли $\bar{u}_3 = \text{const}$ і без втрати загальності припустимо $\bar{u}_3 = 0$. Систему (2.59), (2.60) множенням на $(l\omega)^{-1}$ рівняння (2.59) і на коефіцієнт l^{-1} рівняння (2.60) переводимо до еквівалентної форми

$$\dot{\alpha} = \beta ; \quad (2.61)$$

$$\dot{\beta} = -(\omega')^2 \alpha + \bar{u}_4 . \quad (2.62)$$

Тут використовуються вирази $\alpha = (l\omega)^{-1}\Phi$ і $\beta = l^{-1}\Theta$. Далі, слідуючи [45], вводиться нова змінна $\beta = \kappa(\alpha)$, де $\kappa(0) = 0$. Припустимо, що систему, описану в (2.61), (2.62), можна стабілізувати за допомогою зворотного зв'язку за станом за допомогою керувальної змінної $\beta = \kappa(\alpha)$, де $\kappa(0) = 0$. Тоді, якщо змінну $\kappa(\alpha)$ знайдено, розглянемо розв'язок системи з $\dot{\alpha} = \kappa(\alpha)$ асимптотично стійким рівнянням.

Тут також вводиться кандидат функції Ляпунова, що задовольняє нерівність

$$\dot{L}_1(\alpha) = \frac{\partial L}{\partial \alpha} \dot{\alpha}(\alpha, \beta) \leq -W(\alpha), \alpha, \beta \in \mathfrak{R} , \quad (2.63)$$

де $W(\alpha)$ – позитивно визначена функція.

Нехай $e = \beta - \kappa(\alpha)$, тоді (2.61), (2.62) можна переписати у вигляді

$$\dot{\alpha} = \kappa(\alpha) + e \quad (2.64)$$

$$\dot{e} = -(\omega')^2 \alpha + \bar{u}_4 - \dot{\kappa}(\alpha) = v \quad (2.65)$$

де v – псевдорегулювальна змінна, яка стабілізує змінну α . Дотримуючись методики [45], також вводимо кандидата функції Ляпунова для (2.64), (2.65) і отримуємо

$$\dot{L}_2(\alpha) = \frac{\partial L}{\partial \alpha} \kappa(\alpha) + ev \leq -W(\alpha) + ev. \quad (2.66)$$

Вибираючи

$$v = -\lambda e, \quad (2.67)$$

ми дістаємо

$$\dot{L}_2 \leq -W(\alpha) - \lambda e^2. \quad (2.68)$$

Тут λ – параметр швидкісної збіжності процесу керування.

Як видно, що початок координат, який відповідає точці $\alpha = 0$, $e = 0$, асимптотично стійкий. Якщо $\kappa(0) = 0$, можна встановити, що вихідна точка з координатами $\alpha = 0$, $\beta = 0$ також стабільна. За прикладним підходом [45] та виразами для $v, e, \dot{\kappa}(\alpha)$ можна отримати закон зворотного зв'язку за станом

$$\bar{u}_4 = (\omega')^2 \alpha + \frac{\partial \kappa(\alpha)}{\partial \beta} \beta - W(\alpha) - \lambda(\beta - \kappa(\alpha)). \quad (2.69)$$

Схему реалізації цього алгоритму зображено на рис. 2.8, де показано, що для реалізації керування бекстепінговому контролеру потрібна лише інформація про значення α, β .

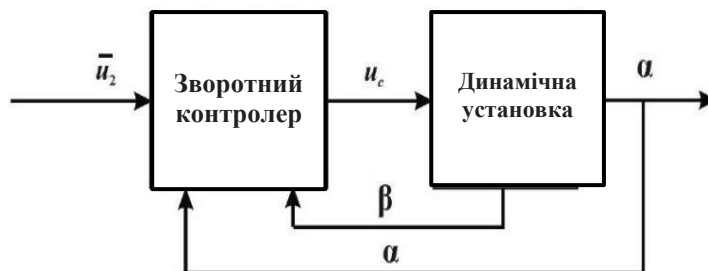


Рис. 2.8. Діаграма алгоритму (2.70)

Розглянутий підхід дав змогу довести таку теорему.

Теорема. Нехай динамічна установка описується системою рівнянь (2.61), (2.62), тоді закон керування (2.69) стабілізувальний для системи рівнянь (2.61), (2.62).

Пропозиція. Нехай Ω_i , Ω^* – вимірювані та еталонні вектори кутових швидкостей відповідно, $1 \leq i \leq N$; N – кількість виконаних вимірювань; $e(\lambda_i)$ – вимірювані та допустимі середньоквадратичні значення похибок вимірювань, які задаються виразом

$$\varepsilon(\lambda_i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\Omega(\lambda_i) - \Omega^*|^2}. \quad (2.70)$$

Тоді існує значення $\lambda_{\max} \leq \Lambda$ (Λ – границя стійкості), яке задовольняє $\varepsilon_{et} = \varepsilon(\lambda_{\max})$ і задовольняє (2.69), (2.70), тобто є

$$\lambda \arg \min_{\lambda_i, 1 \leq i \leq N} \sqrt{\varepsilon(\lambda_i)}_{\max} \quad (2.71)$$

Формули (2.70), (2.71) встановлюють процедуру вибору достатнього значення λ для динамічної установки (2.61), (2.62).

Систему керування, що забезпечує відстеження квадрокоптером змінної вхідної величини для запропонованої математичної моделі, показано на рис. 2.9.

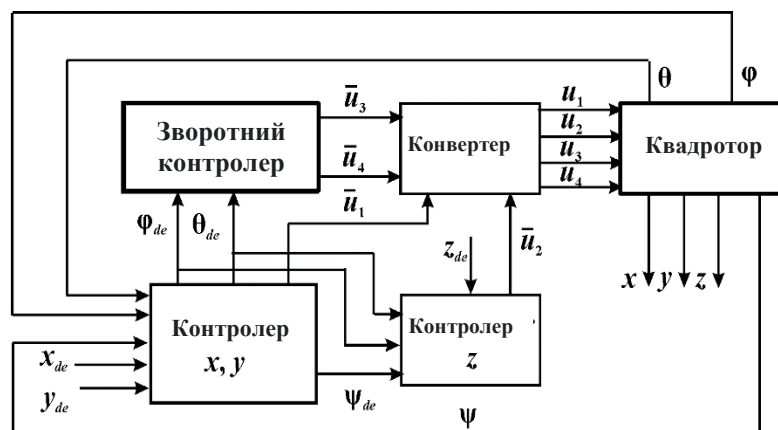


Рис. 2.9. Структура системи керування квадрокоптером

Для підвищення точності стеження система керування побудована за принципом зворотного зв'язку [47]. Також припускаємо, що квадрокоптер має

датчики, які дають можливість отримувати лінійні x, y, z та кутові φ, θ, ψ координати положення квадрокоптера в просторі без завад, що використовуються контролерами для формування сигналів керування. У системі керування є три контролери. Контролер x, y формує керувальний сигнал $\bar{u}_1$, який створює сили, що забезпечують рух квадрокоптера в площині x, y .

Цей регулятор функціонує відповідно до математичної моделі (2.11), (2.12). Регулятор z формує керувальний сигнал $\bar{u}_2$, який впливає на переміщення установки за третьою координатою, рух якої задається рівняннями (2.13), (2.57). Регулятор зворотного зв'язку задає кутові положення φ, θ квадрокоптера під час руху за заданою траєкторією, формуючи керуючі сигнали $\bar{u}_3, \bar{u}_4$. Цей регулятор функціонує відповідно до математичної моделі (2.59), (2.60), (2.69). Контролер перетворює керувальні сигнали в сили (2.51)–(2.54), які визначають положення квадрокоптера в просторі в будь-який момент часу.

Результати моделювання. Як впливає з математичної моделі квадрокоптера, що описується (2.61)–(2.63), кутова динаміка, подана в (2.59), (2.60), не залежить від просторових координат БПЛА. Водночас просторові координати (2.11)–(2.13) повністю визначаються кутовими координатами та їх похідними за часом. Отже, загальна система керування складається з двох незалежних підсистем керування, одна з яких керує поступальною динамікою, її вихідні параметри є початковими даними для другої підсистеми.

Від керування кутовими координатами залежить орієнтація квадрокоптера в тривимірному просторі. Для реалізації руху та стабілізації його положення на деякий час кутові швидкості крену, тангажа та ролу прагнуть підтримувати рівними нульовим значенням. Для виконання цього завдання пропонується використати процедуру зворотного кроку. Початкові параметри для моделювання динаміки прототипу квадрокоптера наведено в табл. 2.3.

Далі розглянемо три варіанти дії системи керування: два випадки тільки зворотного кроку регулятора, у яких ми покажемо його реакцію на ступінчасту і

гармонічну функції, і повний крок регулятора для руху квадрокоптера в ХУ-площині.

Таблиця 2.3 – Деякі фізичні параметри прототипу квадрокоптера, що використовувався в моделюванні

Параметри	Опис	Значення	Одиниці вимірювання
m	Маса транспортного засобу	0,624	кг
d	Відстань між центром мас БПЛА та двигуном	0,3	м
I_1	Момент інерції для осей X	0,0015	кг·м ²
I_2	Момент інерції для осей Y	0,0015	кг·м ²
I_3	Момент інерції для осей Z	0,0027	кг·м ²
I_r	Інерція ротора	$6,8 \cdot 10^{-5}$	кг·м ²

Далі розглянемо три варіанти дії системи керування: два випадки тільки зворотного кроку регулятора, у яких ми покажемо його реакцію на ступінчасту і гармонічну функції, і повний крок регулятора для руху квадрокоптера в ХУ-площині.

Приклад 1. Вхідні дані є ступінчастою функцією.

Моделювання закону керування (2.69) для динамічної системи (2.61), (2.62) з параметром $\omega' = 42$ рад/с на інтервалі $T=10$ с виконано в середовищі Matlab.

На вхід динамічної системи подано одиничну ступінчасту функцію $\bar{u}_4 = 1(t)$; відгук системи без стабілізації подано на рис. 2.10, стабілізацію системи з параметрами закону керування (2.69) $\lambda = 2, 20$ показано на рис. 2.11, а, б. На цьому рисунку пунктирною лінією позначено вихід системи при стабілізації за допомогою локального зворотного зв'язку. На рис. 2.12 показано функцію $\varepsilon(\lambda)$, яка корисна для оцінювання процедури (2.70), (2.71).

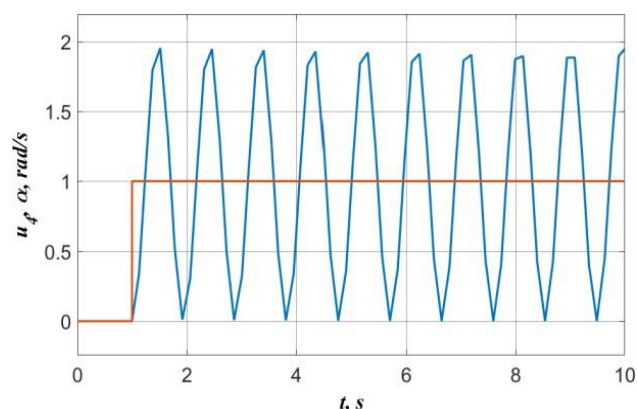
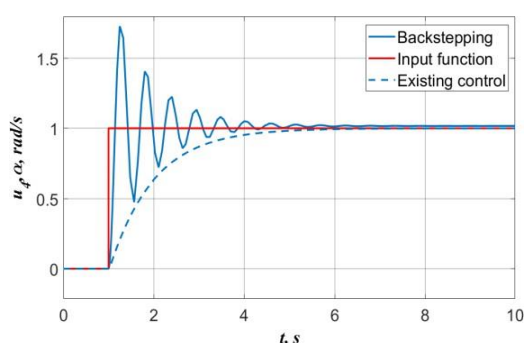
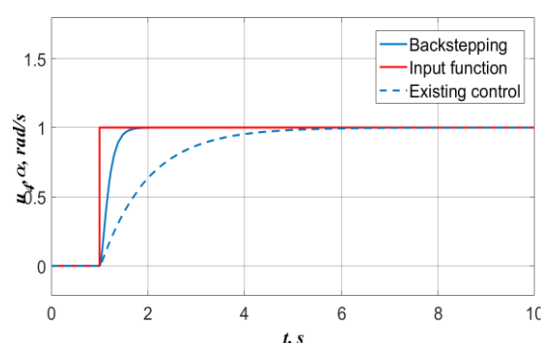


Рис. 2.10. Функції $\bar{u}_4(t)$ (червоний колір) та $\alpha(t)$ (синій колір) без стабілізації



а



б

Рис. 2.11. Функції $\bar{u}_4(t)$ (червоний колір) та $\alpha(t)$ (синій колір) після стабілізації;
а – $\lambda = 2$ та б – $\lambda = 20$

Приклад 2. Вхідні дані є гармонічною функцією. Аналогічно до прикладу 1 це дослідження було проведено для випадку, коли вхідний сигнал змінюється за гармонічною функцією з $\omega = 0,16$ рад/с, тобто $\bar{u}_4(t) = \sin \omega t$, дослідження для сигналу тривалістю $T=10$ с показано на рис. 2.13, 2.14, а, б. Пунктирною лінією на останньому рисунку позначено результат стабілізації за допомогою локального зворотного зв'язку.

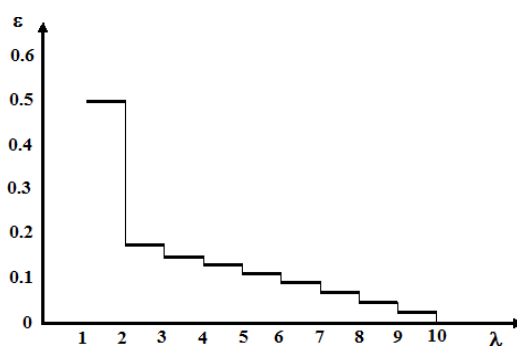


Рис. 2.12. Функція $\epsilon(\lambda)$

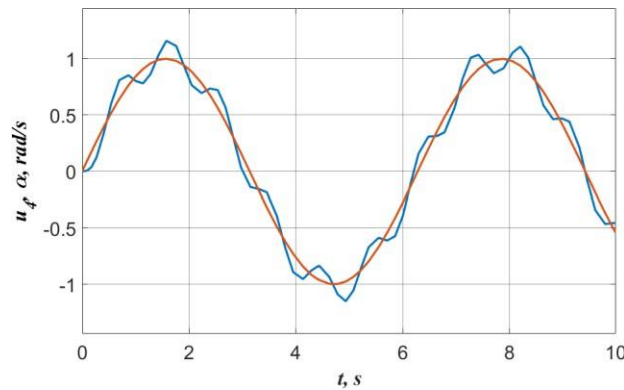


Рис. 2.13. Функції $\bar{u}_4(t) = \sin \omega t$ (червоний колір) та $\alpha(t)$ (синій колір) до стабілізації

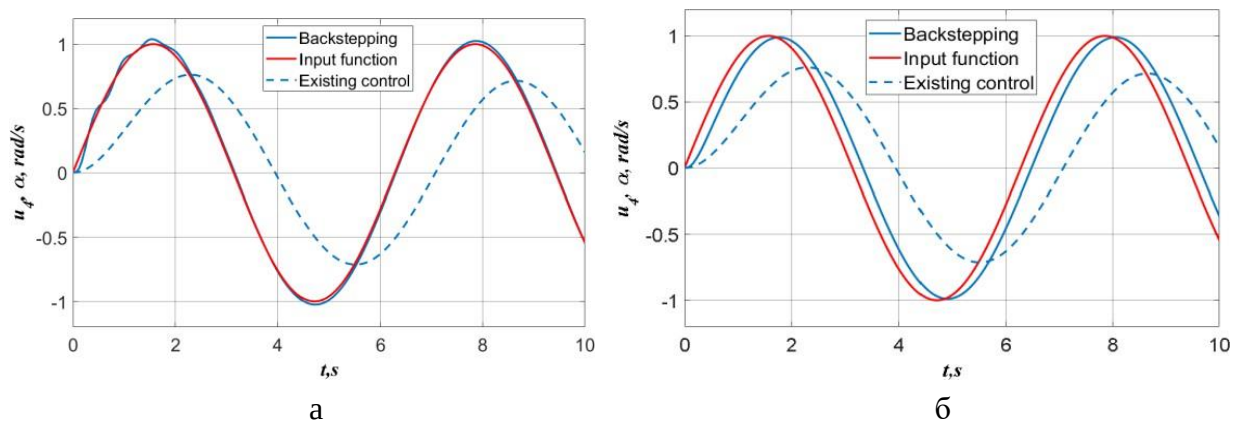


Рис. 2.14. Функції $\bar{u}_4(t) = \sin \omega t$ (червоний колір) та $\alpha(t)$ (синій колір) після стабілізації:
а – $\lambda = 2$ та б – $\lambda = 20$

Як видно з рис. 2.14, б, система керування має постійну похибку для цього типу вхідного сигналу. Стабілізація за допомогою локального зворотного зв'язку призводить до спотворення форми вхідного сигналу.

Приклад 3. Просторова стабілізація. Наведено загальну схему аналізу динаміки в тривимірному просторі. Вона необхідна для повноти дослідження математичної моделі, яка враховує взаємний вплив усіх чотирьох моментів квадрокоптера на траєкторію руху.

Схема містить додаткові позначення $x_{de}, y_{de}, z_{de}, \varphi_{de}, \theta_{de}, \psi_{de}$, які є виходами елементів порівняння відповідних координат. Вхідний сигнал системи керування описується в праці [48]. Тоді розглянемо

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2, z = z_0. \quad (2.72)$$

У цьому разі було поставлено завдання дослідити контролер для відстеження кругової траєкторії. Початкові дані для моделювання $x_0 = 0$ м, $y_0 = 0$ м, $z_0 = 1$ м, $R = 1$ м, $\lambda = 10$ і $\varepsilon_{et} = 0,001$.

Результат цього моделювання показано на рис. 2.15; червона крива – вхідний сигнал; синя крива – траєкторія БПЛА з наявним керуванням; зелена крива – керування з відставанням.

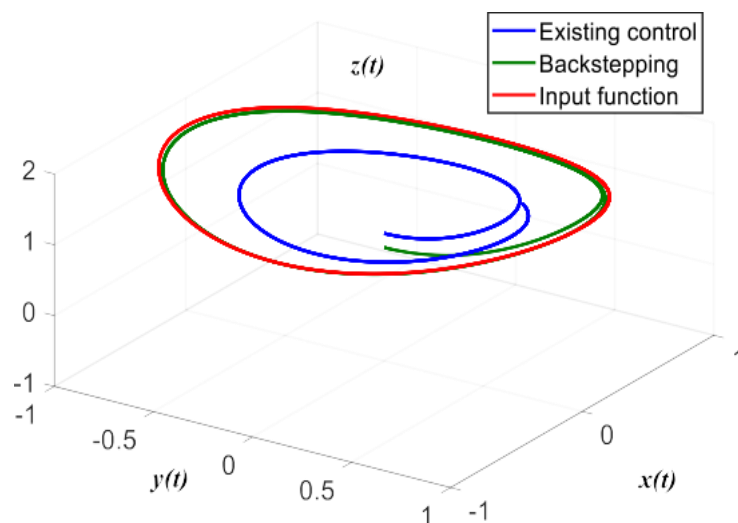


Рис. 2.15. Динаміка системи в тривимірному просторі

Результати на рис. 2.15 підтверджують ефективність стабілізації систем з нелінійною динамікою. Аналіз рис. 2.13–2.15 узгоджується з основним теоретичним результатом щодо стабілізації динамічної системи з нелінійною динамікою. Якість керування суттєво залежить від параметра λ . Аналіз закону керування (2.69), незважаючи на деяку складність аналітичного виводу, показує відносно просту технічну реалізацію, оскільки реалізація спирається на наявні в системі сигнали, що утворюють особливий тип зворотного зв'язку.

Як видно з рисунків, регулятор за допомогою закону керування (2.69) компенсує початкову помилку, стабілізує неузгодженість кутових швидкостей крену, тангажа та рискання і підтримує їх значення рівними нулю. Застосування процедури (2.71) дає змогу отримати $\lambda = 10$ при $\varepsilon_{et} = 0,001$. У цьому дослідженні не враховуються шуми в каналах вимірювання координат. Припускаємо, що

врахування впливу шумів призводить до незначного погіршення точності контролю, але ця проблема потребує розгляду.

Важливою перевагою запропонованого закону керування є його відносна простота технічної реалізації на сучасній елементній базі, а також відсутність необхідності використання класичних ПД-регуляторів та пов'язаних з ними процедур налаштування. Система може бути ефективно реалізована на мікроконтролерах сімейства STM32, зокрема на серіях F4 або H7, які забезпечують достатню обчислювальну потужність при низькому енергоспоживанні.

Орієнтиром у цьому напрямку може слугувати робота [49], де той самий процесор використовується в контурі зворотного зв'язку (PIL – авторська редакція) для забезпечення траєкторії керування квадрокоптером за завершений час у ковзному режимі. Проте реалізація потребує окремої, додаткової роботи, пов'язаної з розробленням повноцінного апаратно-програмного забезпечення для виконання польотних завдань, включно з побудовою каналу радіоуправління, а також апаратури, яка визначає призначення БПЛА, що є подальшим логічним продовженням цієї роботи.

У роботі наведено розв'язок задачі стабілізації керування установкою, що має нелінійну динаміку. Як об'єкт керування, математична модель якого має множинні уявні корені характеристичного рівняння, використано квадрокоптер. Для розв'язання задачі стабілізації в роботі застосовано процедуру зворотного кроку. Алгоритм має конфігурований параметр, що не суперечить попереднім дослідженням. Однак, на відміну від відомих підходів, пропонуємо алгоритм налаштування, який унеможливорює метод спроб і помилок. У дослідженні визначено залежність якості перехідного процесу від одного параметра критерію стабілізації. Цей параметр визначає швидкість стабілізації. Наш внесок у це дослідження полягає у створенні нового алгоритму стабілізації кутового положення квадрокоптера за допомогою процедури зворотного кроку; визначенні залежності якості керування від параметра процедури зворотного кроку. Також запропоновано алгоритм вибору відповідного значення цього параметра шляхом процедурно-спрямованого пошуку. Подальші дослідження планується спрямувати на реалізацію

запропонованого алгоритму. Окрім того, визначити шляхи зменшення динамічної похибки, а також врахувати шуми датчика.

2.3. БПЛА літакового типу

На основі вимог, висунутих до дистанційно пілотованих літальних апаратів за ефективністю та вартістю їх створення і використання, формується математична модель, яка враховує фізичні властивості реального об'єкта управління.

На прикладі цієї моделі розробляються закони управління (на всіх етапах застосування БПЛА). Для забезпечення достовірності (збігу) результатів, отриманих за допомогою моделі та на реальному об'єкті, до самої моделі висуваються вимоги, що забезпечують збіг характеристик математичної моделі $X_m(t)$ і реального об'єкта управління $X(t)$, тобто виконується умова

$$|X(t) - X_m(t)| \rightarrow 0.$$

На прикладі цієї моделі розробляються закони управління (на всіх етапах застосування БПЛА).

Практика підтверджує, що успіх розроблення тієї чи іншої системи управління реальним об'єктом здебільшого залежить від достовірності вибору його математичної моделі та ефективності застосованих методів дослідження (рис.2.16).

У процесі формування в БПЛА загальної структури моделі бортових інформаційно-керувальних комплексів доцільно звернути увагу на те, що функціонально БПЛА складається з п'яти таких частин:

1. Об'єкт управління (розглядається просторовий рух та режими роботи спеціального обладнання).
2. Інформаційно-вимірювальна система (датчики первинної інформації).
3. Обчислювальна система (виконання процедур оцінювання, ідентифікації, оптимізації, керування спеціальним обладнанням).

4. Енергетична система (органи керування рухом, органи керування спеціальним обладнанням).

5. Система комутації (зв'язку) для передавання та приймання інформації на пункти управління за допомогою ретрансляторів.

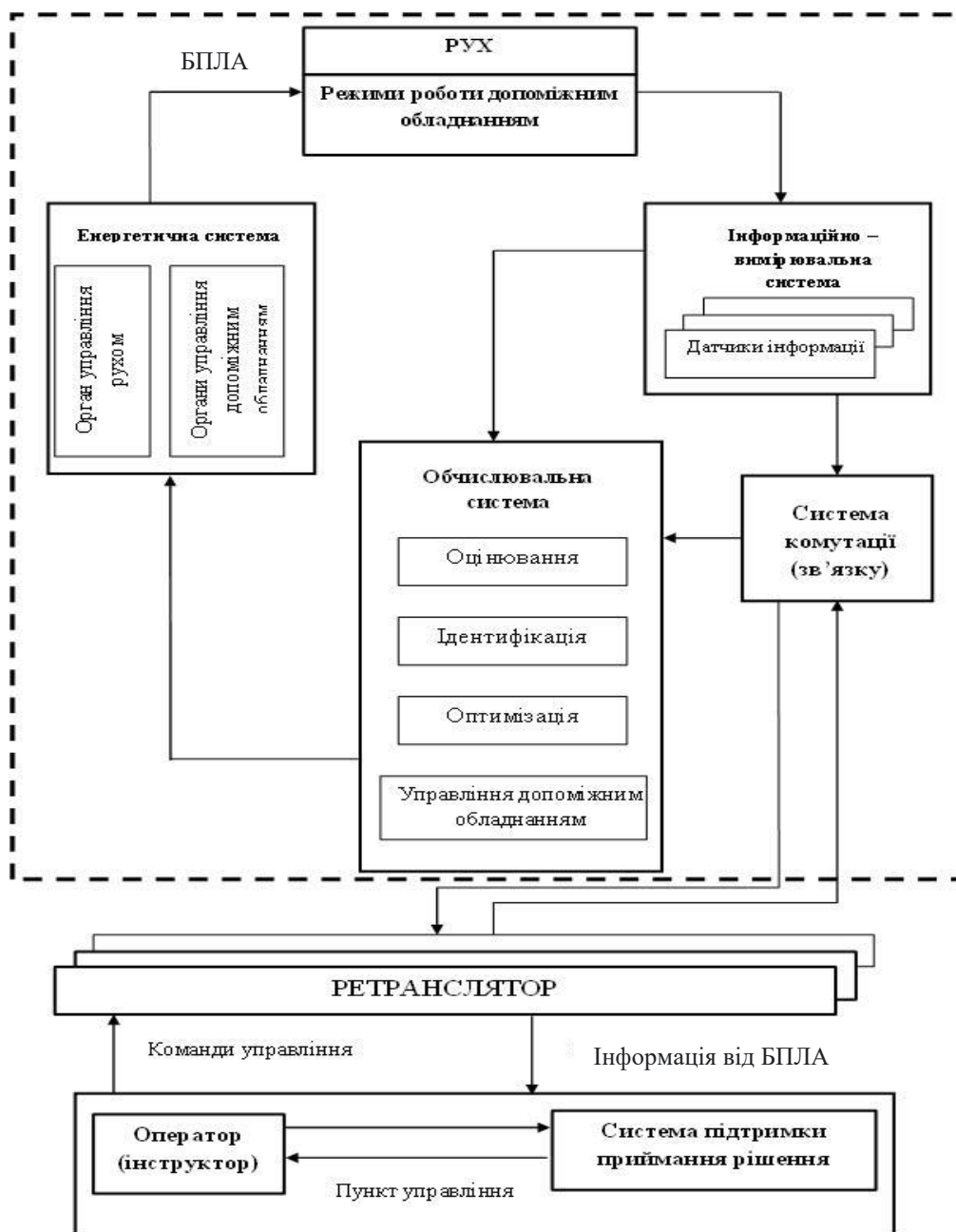


Рис.2.16. Структура системи управління БПЛА

Положення літака у просторі характеризується вектором стану X ($X^T = [X_1, X_2, \dots, X_n]$) або $X \in R^n$. Розмірність цього вектора n визначається вимогами

до деталізації математичного опису БПЛА та може досягати декількох сотень параметрів. Однак не всі вони беруть участь у формуванні управління, виводяться на прилади або використовуються в інших підсистемах літака. Тому під час моделювання як вихідний сигнал беруть вектор вимірювання Z ($Z \in R^m$) – вихід інформаційно-вимірювальної системи. Зазвичай вектор Z має меншу розмірність, ніж X , і, крім того, загалом параметри першого можуть не збігатися з параметрами другого, а надають різні функції від них. Тому виникає завдання відновлення вектора X за вектором Z . Воно може бути виконано відомими методами оптимального оцінювання стану. За таких умов рішення вимагає точних параметрів математичної моделі БПЛА, що здійснюється методом поточної ідентифікації. Усі ці три завдання (оцінювання, ідентифікація, оптимізація) виконуються за допомогою програм у тренажерній обчислювальній системі. Сформований у такий спосіб сигнал керування U надходить на вхід енергетичної системи і містить силову установку та рульові приводи. На виході системи утворюється вхідний сигнал Y , який є відхиленням рульових поверхонь або інших органів управління БПЛА. У такий спосіб замикається контур автоматичного управління БПЛА (додаток В, структурна схема управління БПЛА).

Управління БПЛА здійснюється оператором (інструктором) на основі отримання інформації від датчиків інформації про стан БПЛА: датчики інформації, система комутації (зв'язку), ретранслятор, командний пункт $Z \rightarrow Z_k \rightarrow Z_p$. Формування вектора керування (впливу на роботу БПЛА) здійснюється у зворотному напрямку і оператор-інструктор, ретранслятор, система комутації, обчислювальна система, енергетична система ($U_l \rightarrow U_p \rightarrow U_c \rightarrow U \rightarrow Y$).

Варіанти опису математичних моделей об'єктів управління. Математичні моделі БПЛА (див. Додаток В, блок-схема алгоритма моделі БПЛА, еталонна модель БПЛА) як динамічної системи зазвичай задаються у системами рівнянь: диференціальних, інтегрально-диференціальних, стохастичних. Розглянемо найбільш поширені з них.

1. Детермінована система управління, яка описується векторним диференціальним рівнянням у формі Коші.

Загальна форма моделі має вигляд:

$$\dot{x} = f(x, u, t), \quad (2.73)$$

де x – вектор стану системи розмірності n ; u – вектор керування розмірності m ;

t – безперервний час; f – векторна функція вказаних аргументів.

Це – найзагальніша форма опису поведінки складних динамічних систем. Зокрема, математична модель просторового руху БПЛА подається саме в такому вигляді.

2. Детермінована лінійна управляюча система.

Загальна форма моделі має вигляд:

$$\dot{x} = A x + B u, \quad (2.74)$$

де A – матриця стану системи розміром $(n \times n)$;

B – матриця управління розміром $(n \times m)$.

Загальний розв'язок цього рівняння знаходимо за формулою Коші

$$x(t) = e^{At} x_0 + \int_0^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau, \quad (2.75)$$

де $e^{At} = E + At + A^2 \frac{t^2}{2} + \dots$ – матрична експонента, розміром $(n \times n)$;

$x_0 = x(0)$ – вектор початкових умов; E – одинична матриця.

3. Стохастична управляюча система, яка описується рівнянням Ланжевена

$$\dot{x} = f(x, u, t) + g(x, t) \xi(t), \quad (2.76)$$

де $g(x, t)$ – матрична функція, розміром $(n \times q)$; $\xi(t)$ – q вимірний випадковий процес на кшталт білого шуму з нульовим математичним сподіванням $M[\xi(t)] = 0$

і коваріаційною матрицею типу $M[\xi(t_1)\xi^T(t_2)] = S\delta(t_2 - t_1)$; S – матриця інтенсивності або матриця спектральної щільності.

Зазначимо, що такий опис системи з білим шумом завдає безліч неприємностей під час моделювання, оскільки білий шум має нескінченну дисперсію для своїх компонентів. Однак для практичних задач зовсім не обов'язкове таке суворе трактування стохастичних рівнянь з білим шумом. Річ у тім, що замість білого шуму, якого в природі не існує, в обчислювальній системі тренажера БПЛА доцільно розглядати широкопasmовий шум (з інтервалом кореляції τ_{max} набагато меншим усіх характерних сталих часу цієї динамічної системи). Такий широкопasmовий шум (вже з обмеженими дисперсіями) називається практично білим шумом.

4. Лінійна стохастична управляюча система у формі Ланжевена

$$\dot{x} = Ax + Bu + H\xi(t), \quad (2.77)$$

де $\xi(t)$ – практично білий шум; H – матриця коефіцієнтів розміром $(n \times q)$.

5. Детермінована лінійна управляюча система з дискретним часом.

Якщо в моделі (2.74) і у формулі Коши (2.75) перейти до дискретного часу $t = kT_0$, то можна отримати аналог детермінованої лінійної управляючої системи, але з дискретним часом

$$x[k] = \Phi x[k-1] + Du[k-1], \quad (2.78)$$

де $x[k]$ – решітчаста векторна функція стану; $u[k]$ – решітчаста векторна функція входу; $\Phi = e^{AT_0}$ – дискретний аналог матричної експоненти – матриця стану дискретної системи; $D = \Phi \cdot B \cdot T_0$ – матриця ефективності управління дискретною системою; T_0 – початковий час.

6. Стохастична лінійна управляюча система з дискретним часом.

Ця система відрізняється від системи (2.78) лише наявністю адитивного випадкового члена

$$X^{[k]} = \Phi X^{[k-1]} + Du^{[k-1]} + w^{[k]}, \quad (2.79)$$

де $w^{[k]}$ – випадкова решітчаста функція на кшталт практичного білого шуму:
 $M[w^{[k]}] = 0, M[w^{[k]} * [k-i]] = 0 \quad i=1,2.$

Процес $x^{[k]}$ при заданому u в цьому разі може розглядатись як Марковський випадковий процес, тобто який не залежить від попередньої зміни вектора стану X , а знаходиться тільки значенням координат вектора X у конкретний момент часу. Тобто, $X^{[k+1]}$ залежить тільки від $x^{[k]}$ і не залежить від $X^{[k-1]}, X^{[k-2]}, X^{[k-3]}$, і т. п.

Опис математичних моделей БПЛА. 1. Математична модель БПЛА літакового типу.

Перед тим як записати рівняння руху літака у формі 1, потрібно визначити фізичний зміст вектора стану та вектора управління літака.

Для БПЛА (у загальному випадку) як органи керування можуть використовуватись (рис.2.17).

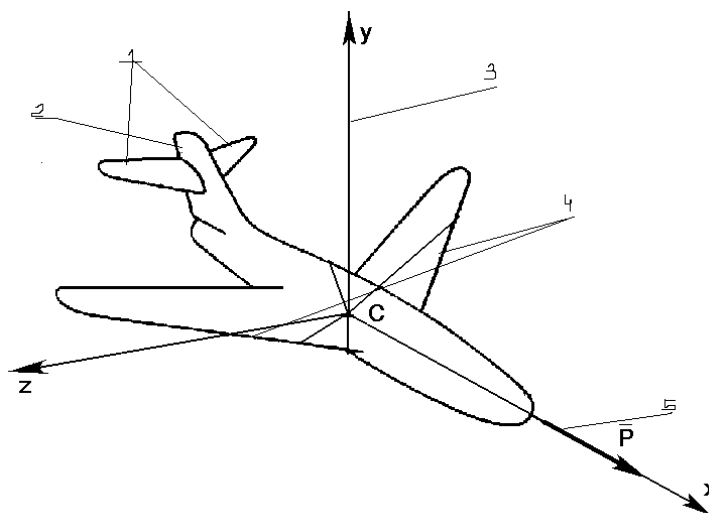


Рис. 2.17. Органи керування БПЛА:

- 1 – диференціальний стабілізатор може працювати в режимі керма висоти (синхронне відхилення) і в режимі елеронів (диференціальне відхилення);
- 2 – кермо напрямку;
- 3 – флаперони (закрылки) – можуть працювати як закрылки (синхронне відхилення) і як елерони (диференціальне відхилення);
- 4 – управляючі носики – відхиляються синхронно і використовуються у злітно-посадкових режимах для підвищення підйімальної сили.
- 5 – орган керування тягою двигуна

На інших типах БПЛА можуть застосовуватися й інші види органів управління: звичайні елерони, передкрилки, закрилки, інтерцептори, елерони і т. д. Але можливо й зменшення кількості органів керування. Усі вони функційно складають вектор керування літака u розмірності m , який через зазначені вище причини для кожного виду БПЛА буде свій. Координати вектора стану БПЛА X визначають його БПЛА у просторі. Це положення встановлює рух БПЛА як центру мас, так і навколо нього. Цей рух розглядається у визначеній системі координат.

2. Нормальна система координат $Ox_gY_gZ_g$:

Початок O розміщений у центрі мас БПЛА, а осі Ox_g , OY_g , OZ_g паралельні відповідним осям нормальної земної системи координат. Відносне положення цих систем координат визначається вектором r між їх початками. Проекція вектора r на вісь OY_g називається геометричною висотою польоту H .

3. Зв'язана система координат $OXYZ$:

Початок O розміщений у центрі мас БПЛА. Вісь Ox напрямлена вздовж БПЛА вперед, зазвичай по головній осі інерції літака, і називається поздовжньою віссю. Вісь Oy лежить у площині симетрії БПЛА та направлена вгору і називається нормальною віссю. Вісь Oz напрямлена праворуч за рухом літака і називається поперечною віссю (рис. 2.18).

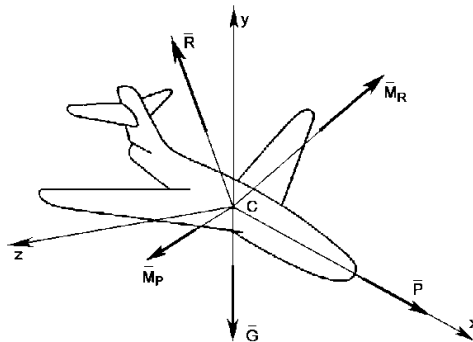


Рис. 2.18. Зв'язана система координат $OXYZ$

Окреме положення осей зв'язаної та нормальної систем координат визначається кутами Ейлера, які в динамічному польоті називаються кутами тангажа ϑ , крену γ , ристання ψ . Ці кути визначають матрицю перетворення однієї системи координат в іншу (матриця напрямних косинусів)

$$D_H^{CB} = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\vartheta & \sin\vartheta\sin\psi - \cos\vartheta\cos\psi\sin\vartheta & \cos\vartheta\sin\psi + \sin\vartheta\cos\psi\sin\vartheta \\ \sin\vartheta & \cos\vartheta\cos\vartheta & -\sin\vartheta\cos\vartheta \\ -\sin\psi\cos\vartheta & \sin\vartheta\cos\psi + \cos\vartheta\sin\psi\sin\vartheta & \cos\vartheta\cos\psi - \sin\vartheta\sin\psi\sin\vartheta \end{bmatrix}. \quad (2.80)$$

4. Швидкісна система координат $OX_aY_aZ_a$:

Початок O розміщений у центрі мас БПЛА. Вісь OX_a напрямлена вздовж вектора повітряної швидкості БПЛА (v) і називається віссю швидкості. Вісь OY_a лежить у площині симетрії, напрямлена вгору і називається віссю підйімальної сили. Вісь OZ_a напрямлена праворуч і називається бічною. Відносне кутове положення зв'язаної та швидкісної системи координат (СК) визначається кутами атаки α і ковзання β :

α – кут між проєкцією вектору повітряної швидкості на площину симетрії і поздовжньою віссю OX ;

β – кут між вектором повітряної швидкості та площиною симетрії БПЛА.

Матриця переходу від зв'язаної до швидкісної СК має такий вигляд:

$$D_C^{CB} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & -\sin\alpha\cos\beta & \sin\beta \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ -\cos\alpha\sin\beta & \sin\alpha\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix}. \quad (2.81)$$

5. Траєкторна система координат $OX_kY_kZ_k$:

Початок розміщений в центрі мас БПЛА. OX_k напрямлена вздовж вектора земної швидкості БПЛА ($V_k = V +$ швидкість вітру). Вісь OZ_k лежить у горизонтальній площині. Вісь OY_k напрямлена вгору. Відносне положення траєкторної та нормальної СК визначається кутом шляху Ψ та кутом нахилу траєкторії Θ :

Θ – кут між віссю OX_k та горизонтальною площиною;

Ψ – кут між віссю OX_g та вертикальною площиною, яка проходить через вісь OX_k .

Матриця переходу від траєкторної до нормальної СК має вигляд:

$$D_H^T = \begin{bmatrix} \cos\alpha\theta\cos\psi & -\sin\theta\cos\psi & \sin\psi \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -\cos\theta\sin\psi & \sin\theta\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix}. \quad (2.82)$$

Рівняння просторового руху стану. Рух БПЛА як твердого тіла може бути описаний двома векторними рівняннями:

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{F}; \quad \frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{M}, \quad (2.83)$$

де $\vec{x}$ і $\vec{k}$ – головний вектор і головний момент кількості руху відносно центру мас; $\vec{F}$ і $\vec{M}$ – головний вектор і головний момент вищих сил, які діють на літак.

Перше рівняння характеризує рух центру мас, а друге – навколо нього. Ці рівняння зазвичай записують у проєкціях на осі відповідних систем координат: перше – у траєкторній системі координат, друге – у зв'язаній. Зазначимо, що за відсутності вітру траєкторна СК збігається зі швидкісною. Тож просторовий рух літака описується наступною системою координат:

$$\begin{aligned} mV &= F_{xk}; \\ mV\theta &= F_{yk}; \\ -mV\cos\theta\psi &= F_{zk}; \\ x_c &= V\cos\theta\cos\psi; \\ H &= V\sin\theta; \\ Z_c &= -V\cos\theta\sin\psi; \end{aligned} \quad (2.84)$$

$$J_x w_x - J_{xy}(w_y - w_x w_z) + (J_z - J_y)w_y w_z = M_{R_x};$$

$$J_x w_y - J_{xy}(w_x + w_x w_z) + (J_x - J_z)w_x w_z = M_{R_y};$$

$$J_z w_z - J_{xy}(w_x^2 - w_y^2) + (J_y - J_x)w_x w_y = M_{R_z};$$

$$\psi = \frac{1}{\cos\alpha} (w_y \cos\gamma - w_z \sin\gamma) v = w_y \sin\gamma + w_z \cos\gamma = w_x - \operatorname{tg} V (w_y \cos\gamma - w_z \sin\gamma);$$

$$\sin\alpha = \frac{1}{\cos\beta} \{ [\sin\alpha \sin\gamma \cos(\Psi - \psi) + \sin\gamma \sin(\Psi - \psi)] \cos\theta - \sin\theta \cos\alpha \cos\gamma \}; \quad (2.85)$$

$$\sin\beta = [\sin\alpha \sin\gamma \cos(\Psi - \psi) - \cos\gamma \sin(\Psi - \psi)] \cos\theta - \sin\theta \cos\alpha \sin\gamma;$$

$$\sin\gamma_a = \frac{1}{\cos\theta} [\cos\alpha \sin\beta \sin\upsilon - \cos\upsilon (\sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - \cos\beta \sin\gamma)],$$

γ_a – швидкісний кут крену,

$$\begin{aligned} F_{xk} &= P \cos(\alpha + \varphi_p) \cos\beta - x_a - mg \sin\theta; \\ F_{yk} &= P [\sin(\alpha + \varphi_p) \cos\gamma_\alpha + \cos(\alpha + \varphi_p) \sin\beta \sin\gamma_\alpha] + Y_\alpha \cos\gamma_\alpha - Z_\alpha \sin\gamma_\alpha - mg \cos\theta; \\ F_{zk} &= P [\sin(\alpha + \varphi_p) \sin\gamma_\alpha - \cos(\alpha + \varphi_p) \sin\beta \cos\gamma_\alpha] + Y_\alpha \sin\gamma_\alpha + Z_\alpha \cos\gamma_\alpha. \end{aligned} \quad (2.86)$$

Аеродинамічні сили, які діють на БПЛА, визначаються його конфігурацією та характером обтікання його повітряним потоком. Так, у швидкісній системі координат три сили знаходять у такий спосіб:

$$x_\alpha = C_{x_\alpha} \frac{\rho V^2}{2} S; \quad Y_\alpha = C_{y_\alpha} \frac{\rho V^2}{2} S; \quad Z_\alpha = C_{z_\alpha} \frac{\rho V^2}{2} S. \quad (2.87)$$

Тут S – площа крила літака; $\frac{\rho V^2}{2} = q$ – швидкісний напір; C_i – аеродинамічні коефіцієнти (безрозмірні).

Проекції сумарного моменту на осі зв'язаної системи координат мають вигляд:

$$M_{R_x} = m_x \frac{\rho V^2}{2} S l; \quad M_{R_y} = m_y \frac{\rho V^2}{2} S l; \quad M_{R_z} = m_z \frac{\rho V^2}{2} S b_\alpha. \quad (2.88)$$

Тут l – розмах крила; b_α – середня аеродинамічна хорда.

Отже маємо систему диференціальних рівнянь $(\cdot)$ у формі Коші (відносно перших похідних). Відомо, що такі системи розв'язуються досить легко на сучасних ЕОМ методом числового інтегрування. Однак існує низка проблем щодо створення таких математичних моделей, зокрема числа задання аеродинамічних коефіцієнтів: C_{x_α} , C_{y_α} , C_{z_α} , m_x , m_y , m_z .

Особливості задання аеродинамічних коефіцієнтів літака. Коефіцієнти C_i та m_i аеродинамічних сил і моментів, які входять у математичну модель БПЛА як

об'єкта управління, загалом залежать від конфігурації БПЛА (компонування ЛА, положення кермових органів) та умов польоту:

$$\begin{aligned} C_i &= f_i(\alpha, \beta, \delta_i, M, R_e \dots); \\ m_i &= \varphi_i(\alpha, \beta, \alpha, \beta, \omega_x, \omega_y, \omega_z, M, R_e, \dots). \end{aligned} \quad (2.89)$$

Тут $M = V/a$ – число Маха; a – швидкість звуку; $R_e = V_{ba}/\nu$ – число Рейнольдса; ν – кінетичний коефіцієнт густини повітря.

Визначення цих залежностей складає основу такої науки, як аеродинаміка літака. У практиці аеродинамічного розрахунку ЛА для коефіцієнтів C_i та m_i зазвичай використовують залежність лише від частини вказаних параметрів, а саме:

$C_x = C_{x_0} + C_x^\alpha \alpha + C_x^\beta \beta$ – коефіцієнт лобового опору;

$C_y = C_{y_0} + C_y^\alpha \alpha + C_x^{\delta_b} \delta_b$ – коефіцієнт підйимальної сили;

$C_z = C_z^\beta \beta + C_z^{\delta_h} \delta_h$ – коефіцієнт бічної сили;

$m_x = m_x^{\bar{\omega}_x} \bar{\omega}_x + m_x^\beta \beta + m_x^{\bar{\omega}_y} \bar{\omega}_y + m_x^{\delta_e} \delta_e$ – коефіцієнт моменту крену ЛА;

$m_y = m_y^\beta \beta + m_y^{\dot{\beta}} \dot{\beta} + m_y^{\bar{\omega}_y} \omega_y + m_y^{\omega_x} \omega_x + m_y^{\delta_h} \delta_h$ – коефіцієнт ристання ЛА;

$m_z = m_{z0} + m_z^\alpha \alpha + m_z^{\dot{\alpha}} \dot{\alpha} + m_z^{\omega_z} \omega_z + m_z^{\delta_b} \delta_b$ – коефіцієнт моменту тангажа ЛА.

Тут $C_x^\alpha = \frac{\nu C_x}{\nu \alpha}$ – відповідні часткові похідні;

$\bar{\omega}_x = \omega_x \frac{l}{2V}$; $\bar{\omega}_y = \omega_y \frac{l}{2V}$; $\bar{\omega}_z = \omega_z \frac{b_a}{V}$;

$\dot{\alpha} = \dot{\alpha} \frac{b_a}{V}$; $\dot{\beta} = \dot{\beta} \frac{l}{2V}$ – безрозмірні кутові швидкості;

$\delta_b, \delta_e, \delta_h$ – відхилення керма висоти, елеронів, і керма напрямку відповідно.

2.4. Система управління рухом крену

Обертання літального апарата в польоті навколо поздовжньої осі може здійснюватися системою управління рухом крену [50]. Органом управління в цьому разі є елерони. У найпростішому випадку в систему управління крім елеронів входять формувач заданого кута крену γ_z , сервопривід СП, кермовий

привід РП, датчик кутового положення (гіровертикаль) ГВ, датчик кутової швидкості ДКШ, суматор сигналів СУ (рис. 2.19). Кут крену γ_z задається або пілотом, або спеціальним обчислювачем траєкторного управління системи автоматичного управління польотом.

Для отримання рівняння динаміки літального апарата за креном скористаємося результатами роботи [51], відповідно до якої рух абсолютно жорсткого тіла в повітряному просторі описується рівняннями моментів щодо поздовжньої осі

$$J_x \frac{d^2\gamma}{dt^2} = m_x S l \frac{\rho V^2}{2} + M_{36}(t), \quad m_x = f(V, \gamma, \delta_e), \quad (2.90)$$

де J_x – момент інерції літального апарата щодо поздовжньої осі; γ – кут крену; m_x – коефіцієнт моменту сил, що діють на літальний апарат; S – площа крила; l – розмах крила; ρ – щільність повітря; V – швидкість польоту літального апарата; $M_{36}(t)$ – момент сил, що збурюють; δ_e – кут відхилення елеронів.

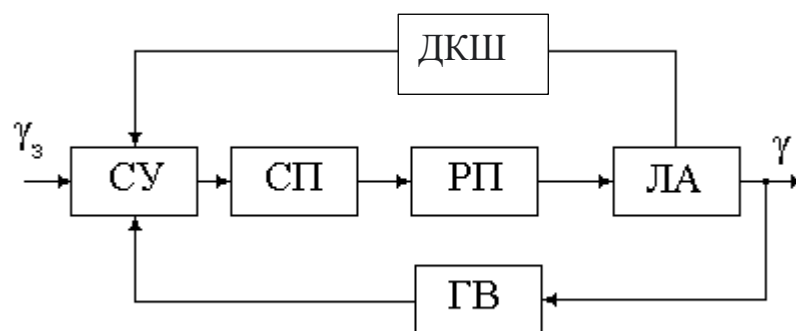


Рис. 2.19. Структура системи управління креном

Система рівнянь (2.90) є нелінійною зі змінними параметрами. Параметри J_x і m_x , що входять у ці рівняння, залежать від швидкості польоту та часу. Для лінеаризації цих рівнянь необхідно визначити малі відхилення параметрів руху літального апарата в разі незбуреного (розрахункового) руху. Для цього скористаємося такими співвідношеннями:

$$V = V_0 + \Delta V ;$$

$$\gamma = \gamma_0 + \Delta \gamma ;$$

$$\delta_e = \delta_{e0} + \Delta \delta_e .$$

Вважатимемо, що використовується автопілот, здатний швидко парирувати крен, що допомагає знехтувати впливом моментів рискання на крен; не будемо брати до уваги також вплив відхилення моментів у разі відхилення керма напрямку і моменти, що виникають від сили тяги двигуна. Тоді, нехтуючи величинами другого порядку малості, отримаємо рівняння динаміки літального апарата у відхиленнях:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta \gamma}{dt^2} = & \left(\frac{\rho V_0^2 S l}{J_x} m_{x0} + \frac{\rho V_0^2 S l}{2 J_x} m_x^v \right) \Delta V + \frac{\rho V_0^2 S l}{2 J_x} \frac{d \Delta \gamma}{dt} + \\ & + \frac{\rho V_0^2 S l m_x^{\delta_e}}{2 J_x} \Delta \delta_e(t) + \frac{M_B(t)}{J_x} . \end{aligned} \quad (2.91)$$

З огляду на те, що поворот за креном літального апарата відбувається за короткий проміжок часу, протягом якого швидкість його польоту практично не змінюється, тобто $\Delta V = 0$, рівняння (2.91) набуває такого вигляду:

$$\frac{d^2 \Delta \gamma}{dt^2} + c_{11}(t) \frac{d \Delta \gamma}{dt} = c_{12}(t) \Delta \delta_e(t) + c_{13}(t) M_B(t) , \quad (2.92)$$

де

$$c_{11}(t) = \frac{\rho V_0^2 S l^2}{2 J_x} , c_{12}(t) = \frac{\rho V_0^2 S l m_x^{\delta_e}}{2 J_x} , c_{13}(t) = -\frac{1}{J_x} . \quad (2.93)$$

Рівняння (2.92) є лінійним зі змінними коефіцієнтами. Коефіцієнт $c_{11}(t)$ являє собою приріст кутового прискорення крену і є негативним, оскільки кутове

прискорення завжди спрямоване в бік, протилежний кутовій швидкості. Коефіцієнти c_{11} , c_{12} , c_{13} є функціями часу, їх значення встановлюються якістю вимірювання величин, що входять у співвідношення (2.93) [52].

Для визначення місця пропонованих нейромережових структур групових дій у бортовому комплексі БПЛА управління груповими діями є ієрархічним процесом, який умовно можна розбити на три рівні (рис. 2.20).

Стратегічний рівень, або рівень прийняття рішення про вибір поведінки, полягає в оперативному плануванні за реальним часом групових дій БПЛА з організацією їх взаємодопомоги і з розв'язуванням виникаючих конфліктів у виборі напрямку польоту, щоб уникнути зіткнення БПЛА один за одним.

Завданням оперативного рівня є формування траєкторії польоту групи БПЛА.

Третій, тактичний рівень (виконавчий), – це рівень системи управління самим БПЛА, до завдань якого належить підтримання або відпрацювання за допомогою управляючих органів, що задають дію за такими сигналами, як напрямок руху, швидкість, висота польоту до цілі. На рис. 2.20 схематично зображено процес управління груповим польотом.

2.5. ПІД-регулятор в системі управління БПЛА

Створення безпілотних літальних роботів є осередком сучасної теорії управління. Це здебільшого визначається необхідністю практичного застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у низці завдань, серед яких важливе місце посідають моніторинг і контроль об'єктів на земній поверхні. Окрім того, існують конкретні завдання, пов'язані з груповим управлінням, наприклад, створення радіомережі в недоступних місцях для прокладання дротових ліній зв'язку. Місія польотів БПЛА в закритому просторі дуже важлива. Водночас необхідно розв'язувати проблеми позиціонування, переміщення за певним маршрутом, пошук маршруту, зависання як одного БПЛА, так і всієї групи.

Розглядається проблема позиціонування БПЛА з ПД-контролером та використанням градієнтного підходу до налаштування його параметрів.

Система управління з використанням ПД-контролера визначається дизайнерами як основний спосіб проєктування промислових систем керування. ПД-контролер зазвичай містить три паралельно з'єднані блоки, як-от пропорційний, інтегральний і диференціальний з регульованими параметрами, які гарантують бажану якість перехідного процесу.

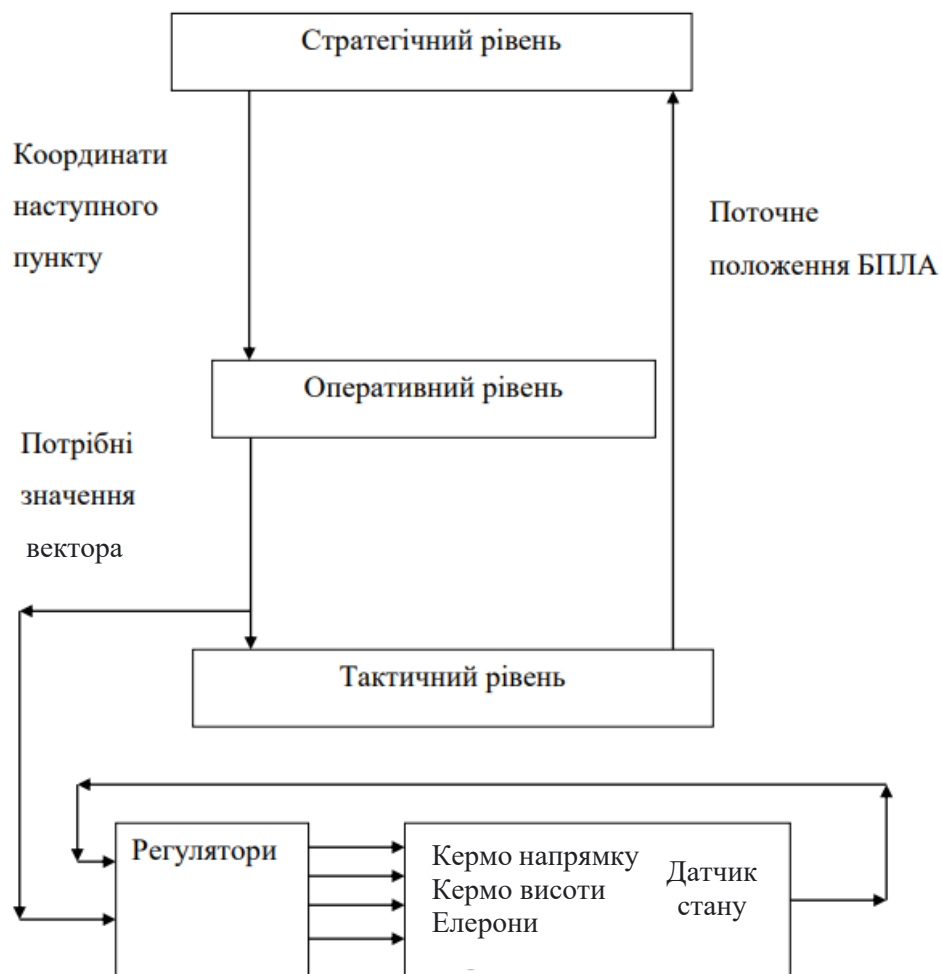


Рис. 2.20. Тривірнева схема управління польотом БПЛА:
стратегічний рівень (рівень планування застосування групи БПЛА);
оперативний рівень (рівень планування траєкторії польоту);
тактичний рівень (виконавчий)

Найпоширеніші методи налаштування ПД-контролера описані в монографії відомими авторами [53]. У цій праці надається низка нових методів, заснованих на автоматичному налаштуванні, що передбачає адаптацію та навчання. Сучасний

стан програмно-апаратних засобів для розроблення ПІД-контролерів можна знайти в праці [54]. Загальну методику налаштування параметрів ПІД-контролера для стаціонарного процесу з використанням найпрактичнішого методу Циглера Ніколса наведено в [55].

У роботі [56] розглянуто питання розуміння теоретичного опису та практичного застосування контролерів. Автори переконані в необхідності фільтрації вхідних даних для побудови ефективного ПІД-контролера.

Деякі теоретичні результати глобальної стабілізації та асимптотичної стійкості для ПІД-контролерів у замкнутих контурах з невідомими параметрами наведені в [57].

Heinänen [58] вивчав алгоритми автоматичного налаштування ПІД-контролерів. Перевага надавалася контролеру, який налаштовується за допомогою методу оптимізації Luus-Jaakola. Автор не досліджував перешкоди в каналах вимірювання координат.

Типове налаштування контролера визначається бажаними параметрами перехідного процесу. Для цього зручно використовувати відому математичну модель установки. У роботі [59] запропоновано синтезувати контролер за допомогою математичної моделі установки, яка не завжди може бути точно визначена.

Можлива відсутність інформації про точну математичну модель контрольованого процесу може бути компенсована в моделі першого або другого порядку введенням блока затримки. Аналогічний підхід до синтезу ПІ і ПІД-контролерів для об'єктів із затримкою був запропонований у роботі [60]. Бажана якість перехідних процесів досягалася мінімізацією верхньої межі норми H_∞ матричної передавальної функції замкнутої системи. Рішення синтезовано з використанням методів оптимізації H_∞ з обмеженнями лінійних матричних нерівностей (LMI).

Підхід до синтезу ПД-регулятора на основі оптимізації H_2/H_∞ наведено у роботі [61]. У цій праці процедура визначення параметрів контролера ґрунтується на використанні генетичних алгоритмів.

Гібридний ПД-контролер для управління нагріванням печі, розглянутої авторами в [62], описується передавальною функцією першого порядку з затримкою. Затримка компенсується застосуванням оператора Сміта до системи налаштувань контролера. Стабільність контролера в циклі замкнутої системи оцінюється даними LMI.

У роботі [63] наведено аналіз закону керування ПД-контролером для керування хімічним процесом під час відстеження дії нелінійного драйвера. За допомогою розбиття траєкторії на окремі ділянки і перемикання параметри ПД-контролера оптимізуються для кожної секції траєкторії. Використовуючи цей підхід, розробникам вдалося отримати найкращу якість відстеження вхідних даних системи.

Автори [64] пропонують налаштування ПД-контролера для систем із затримками модифікованим оператором Сміта, з огляду на прогноз розвитку перехідного процесу. Налаштування передбачає оцінювання середнього часу затримки в просторі станів зважаючи на особливий тип LMI, де вводиться інформація про стан об'єкта від спостерігача.

Дослідження можливостей використання ПД-контролера в нелінійних системах в умовах невизначеності, порядок яких вище другого, а для нелінійності, що перевищує лінійне зростання, розглянуто в [65]. Однією з умов існування параметрів контролера є накладення обмежень як на початковий стан, так і на нелінійну функцію Ліпшица з відомою константою обмеження.

Метод налаштування ПД-регулятора для установок з невідомими параметрами наведено в [66]. Контролер налаштований на гармонічний тестовий сигнал. Це дає змогу розрахувати похибку і налаштування параметрів контролера.

Отже, в праці [67] запропоновано структуру ПД-контролера для стабілізації руху чотирироторного типу БПЛА. Структуру було перевірено за допомогою

MatLab Simulink, де налаштування ПД-контролера реалізовано за допомогою методу Циглера Ніколса. У системі стабілізації використовуються чотири ПД-контролера, де пара контролерів використовується для стабілізації рухомого руху і контролю висоти планера, друга пара – комбінації контролерів для стабілізації кута ролу і кута крену.

Застосування ПД-контролера для керування кутом тангажа БПЛА, що є системою вище, ніж у другому порядку, розглянуто в [68]. Параметри ПД-контролера встановлюються на основі відомого характеристичного рівняння розв’язуванням набору алгебричних рівнянь. Ця процедура завершується налаштуванням загального коефіцієнта передавання для необхідних параметрів перехідного процесу.

Порівняння різних типів установок ПД-контролера для платформи квадрантора, запропонованої авторами [69], показало, що ПД-регулятор, налаштований з використанням лінійно-квадратичної теорії, має найкращі показники перехідного процесу. Аналогічний підхід був реалізований у роботі [70], де ПД з параметрами, скоригованими відповідно до процедури оптимізації вектора Ука-Джива, порівнювався з оптимальним контролером для автопілота судна.

Автори [71] розробили метод синтезу ПД-контролера, який не передбачає знання точної математичної моделі керованої установки. Однак автори отримують її наближення, вивчаючи частотну характеристику системи, за формою якої можна визначити нулі і полюси передавальної функції системи. Зручною характеристикою для отримання наближеної математичної моделі установки є діаграма Бode, а також графік частотної характеристики системи в обмеженому діапазоні частот. Параметри контролера задовольняють деякі лінійні нерівності, отримані на основі наближеної математичної моделі.

Налаштування ПД-контролера під час керування вектором кутової швидкості гексакоптера методом Циглера Ніколса наведено в [72]. Проведено порівняння динаміки БПЛА у контролі ПД- і лінійно-квадратичних контролерів. У цьому документі робиться висновок про перевагу лінійно-квадратичного контролера під час контролю в умовах перешкод.

Синтез I_1 -оптимального автопілота на основі P і P_i -контролерів, що гарантує стабільну динаміку під час керування бічним рухом, представлений в роботі [73].

У праці [74] наведено експериментальну розробку дробового ПД-контролера в режимі ковзання. Пропорційна складова контролера залежить від ковзної змінної, а інтегральна складова послаблює різко виражені порушення, як от порив вітру. Незважаючи на хороші стабілізаційні властивості, контролер має помилки з малими відхиленнями для великих збурень.

У дослідженні [75] де вивчається градієнтний підхід до налаштування ПД-регулятора, що використовується в автопілоті квадранта. Моделювання динаміки БПЛА ґрунтується на математичній моделі, запропонованій авторами [13], і перевіряється законом перемикання управління для виконання тих самих завдань [76].

Як автопілот використовуватимемо ПД-контролер, вихідні сигнали якого описуються рівняннями

$$u_j(t) = k_{pj}e(t) + \frac{1}{T_{ij}} \int e(t)dt + T_{dj} \frac{de(t)}{dt}. \quad (2.94)$$

У (2.69) k_{pj}, T_{ij}, T_{dj} – регульовані параметри ПД-контролера, які визначають коефіцієнт передавання пропорційних, інтегровальних і диференціальних одиниць. Задля подальшого синтезу введемо нову нотацію для коефіцієнтів пропорційності ПД-контролера вигляду $q_{1j} = k_{pj}$, $q_{2j} = 1/T_{ij}$, $q_{3j} = T_{dj}$. Тоді (2.94) можна записати як

$$u_j(t) = q_{1j}e(t) + q_{2j} \int e(t)dt + q_{3j} \frac{de(t)}{dt}. \quad (2.95)$$

Структура системи з ПД-контролером приймає форму, показану на рис.2.21.

Налаштування ПД-регулятора здійснюватиметься зважаючи на функцію якості, що має форму

$$I = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \leq \varepsilon, \quad (2.96)$$

де e – вектор відхилення вихідних координат керованої системи; ε – досить мала величина, $\varepsilon \in R^+ \setminus \{0\}$.

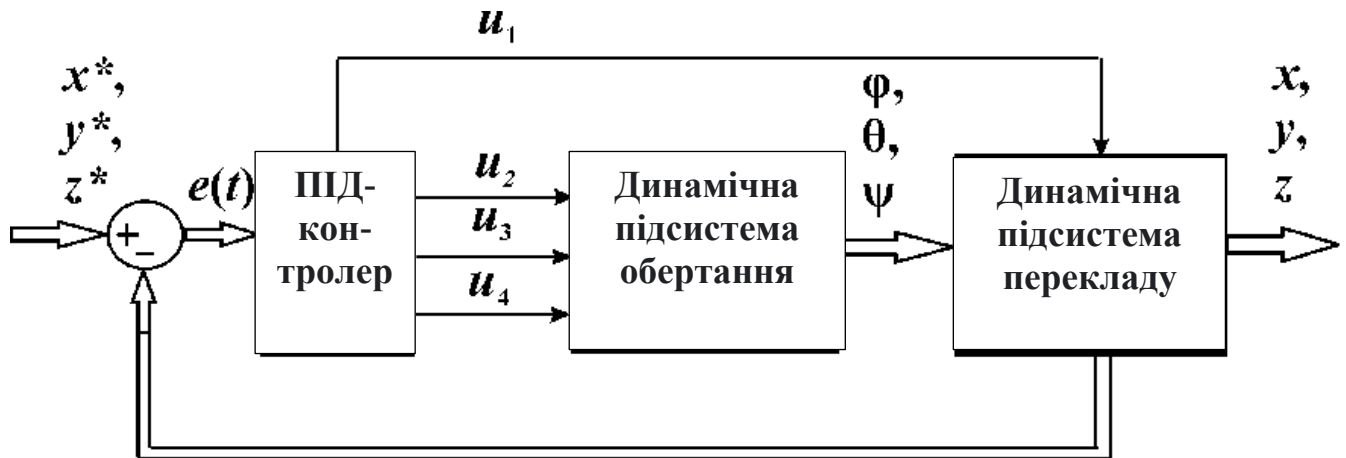


Рис. 2.21. Структура автопілоту з ПІД-контролером

Мінімальні значення функцій (2.96) забезпечують мінімальну значущість, що виникає під знаком інтеграції за весь інтерфейс управління, а також можливість і мінімальний час керування протягом всього процесу управління.

Метою дослідження є визначення параметрів ПІД-контролера, що забезпечує мінімальне значення (2.96) для керованого динамічного об'єкта, що описується диференціальними рівняннями (2.97)–(2.99).

Беручи до уваги ефект Коріоліса, динаміка обертання центру мас БПЛА може бути подана в такому вигляді

$$\ddot{\phi}(t) = \frac{(I - I_3)}{I} \dot{\theta}(t) \dot{\psi}(t) - \frac{J_r}{J} \dot{\theta}(t) \Omega + \frac{c}{I} u_2(t); \quad (2.97)$$

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{(I - I_3)}{I} \dot{\psi}(t) \dot{\phi}(t) - \frac{J_r}{J} \dot{\phi}(t) \Omega + \frac{c}{I} u_3(t); \quad (2.98)$$

$$\ddot{\psi}(t) = \frac{1}{I} u_1(t). \quad (2.99)$$

У рівняннях (2.97)–(2.99) відстань від центру мас до i -го двигуна враховується коефіцієнтом c . Керувальні дії u_1, u_2, u_3 , які забезпечують обертальний рух пристрою, набувають вигляду

$$u = M_1 + M_2 - M_3 - M_4 = k_1 \Omega_1^2 + k_2 \Omega_2^2 - k_3 \Omega_3^2 - k_4 \Omega_4^2; \quad (2.100)$$

$$u_2 = M_4 - M_2 = k_4 \Omega_4^2 - k_2 \Omega_2^2; \quad (2.101)$$

$$u_3 = M_1 - M_3 = k_1 \Omega_1^2 - k_3 \Omega_3^2. \quad (2.102)$$

У цих рівняннях k_i – певний коефіцієнт пропорційності, пов’язаний з кутовою швидкістю Ω_i i -го виконавчого двигуна, що забезпечує необхідну силу.

Алгоритм оптимізації. Налаштування ПІД-контролера є складною і трудомісткою процедурою, яка не завжди забезпечує оптимальне налаштування на практиці. Контролер конфігурується на основі апріорно невідомих параметрів контрольованого об’єкта. Крім того, контролер має кілька регульованих параметрів, які мають різний вплив на обраний функціонал якості (2.96). Тому на практиці досить часто застосовуються способи налаштування на основі експериментальних даних.

Розглянемо порядок знаходження параметрів контролера, для якого перепишемо функціонал якості (2.96) у форму

$$I(q) = \sum_{i=0}^{\infty} e_i^2(q) dt \leq \varepsilon, \quad (2.103)$$

де q – вектор змінних параметрів регулятора.

Алгоритм встановлення параметрів ПІД-контролера може бути реалізований ітераційною процедурою. Типова ітерація алгоритму налаштування є виразом у вигляді

$$q_l = q_{l-1} + \varphi_{l-1}(h_{l-1}, p_{l-1}), \quad (2.104)$$

де q_l – значення параметрів на l -му кроці; h_l – значення l -го кроку; p_l – напрямок зміни параметра на l -му кроці. Правильно підібраний параметр h_l і знайдене значення напрямку лінійного пошуку p_l визначають кінцеві значення бажаних параметрів. Умовою збіжності алгоритму є зменшення p_l , тобто $p_l^T = \nabla f_l < 0$, де f – функція, яка зменшується в цьому напрямку.

Лема. Припустимо, що існують функції $\varphi_l(h, p)$, $l = 1, 2, \dots$, $p_l \in R^n$, реальна функція $V(q)$, де $q \in R$ і серія $\delta_1 + \delta_2 + \dots = +\infty$ є для будь-якої послідовності $q_1 \in R$, $q_2 = q_1 + \varphi_1(h, p)$, ..., $q_i = q_{i-1} + \varphi_{i-1}(h, p)$, де $h > 0$, p – вектори деякої множини M евклідового або дійсного гільбертового простору і $\varphi_l(h, p) \leq 0$; $V(q_{i-1}) - V(q_i) \geq 0$. Тоді алгоритм $q_i = q_{i-1} + \varphi_{i-1}(h, p)$, де

$$\varphi_i(h, p) = \begin{cases} \varphi_i(h, p), & \text{if } p_i > 0; \\ \varphi_i(h_i, p_i), & \text{if } p_i \leq 0 \end{cases} \quad (2.105)$$

сходяться для кінцевого числа поправок r , число кроків r задовольняє співвідношення $\delta_1 + \dots + \delta_r \leq V(q_1)$.

Доведення. Робимо серію p_i видаляючи з послідовності $p_1, p_2, \dots$, вектори, для яких $\varphi_{i-1}(h, p) > 0$. Змінюючи нумерацію, отримуємо послідовність, яка задовольняє умови леми.

Потім для будь-яких n членів цієї послідовності

$$\delta_1 + \dots + \delta_n \leq \sum_{i=1}^n [V(q_{i-1}) - V(q_i)] = V(q_1) - V(q_n) \leq V(q_i), \quad (2.106)$$

З (2.106) випливає доведення леми.

Теорема. Припустимо, що

$$\max_{p \in P} |p|^2 = M; \quad (2.107)$$

і

$$\min_{q \in Q} pq \equiv a, \quad (2.108)$$

де $a > 0$, то для числа поправок r оцінка істинна.

$$r \leq \frac{M}{a} |q|^2. \quad (2.109)$$

Доведення. Повністю доведення теореми наведено в додатку Г.

Розглянемо методи координатного спуску, градієнтного спуску і найшвидшого спуску, припускаючи, що мінімум функціоналу (2.103) можна знайти у працях [77, 78].

Заміна функції $\varphi_l(h, p)$ в алгоритмі (2.104) знаковою функцією

$$\varphi_l(h, p) = h \cdot \text{sign} \nabla f_l; \quad (2.110)$$

$$\text{sign}(\cdot) = \begin{cases} 1, & \text{if } f(\cdot) > 0; \\ -1, & \text{if } f(\cdot) \leq 0, \end{cases} \quad (2.111)$$

де отримуємо метод координатного спуску. Ідея алгоритму для випадку двох координат ілюструється траєкторією від точки A до точки O , як це показано на рис. 2.22.

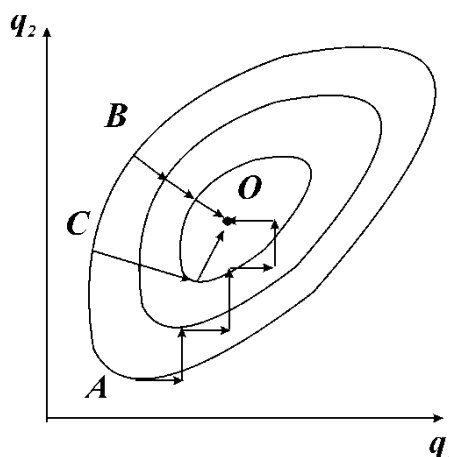


Рис. 2.22. Шляхи пошуку алгоритмів оптимізації

На кожному новому кроці алгоритму визначається лінія рівня, за якою відбувається оптимізація. Для підвищення точності алгоритму необхідно скоротити крок, що значно збільшує час пошуку.

Пряме застосування функції $\varphi_l(h, p)$

$$\varphi_l(h, p) = h \cdot \nabla f_l \quad (2.112)$$

призводить до способу пошуку градієнта. З (2.112) випливає, що крок зміни кожного параметра виконаний відповідно до компонента градієнтного вектора. Критерієм зупинки пошуку в цьому методі є досягнення мінімального значення виразу (2.96). Задля сходження параметрів до мінімальної точки, крок апроксимації повинен бути змінений відповідно до умови

$$h_l = (q_l - q_{l-1}) \frac{\frac{\partial I(q_l)}{\partial q} - \frac{\partial I(q_{l-1})}{\partial q}}{\left\| \frac{\partial I(q_l)}{\partial q} - \frac{\partial I(q_{l-1})}{\partial q} \right\|}. \quad (2.113)$$

У разі наближення до кінцевої точки, згідно з (2.112), алгоритм висоти h_l зменшується, що дає змогу досягти високої точності алгоритму. Це перевага запропонованого підходу. Траєкторію пошукового рішення розв'язку показано на рис. 2.22 з початком у точці B .

Якщо змінити крок на початковій і кінцевій частинах траєкторії, можна отримати метод найшвидшого спуску. Відповідно до цього методу, крок до мінімальної площі збільшується до досягнення встановленого мінімуму функціонала (2.96).

Відтак, крок зменшується і розраховується вища точність для розрахунку оптимального значення під час переміщення до мінімальної точки функціонала. У цьому разі напрямок руху збігається з (2.112), і наступний крок повинен бути виконаний, щоб досягнути мінімуму функції

$$f(h) = I\left(q - h \frac{\partial I(q)}{\partial q}\right). \quad (2.114)$$

У рівнянні (2.89) h – множник Лагранжа. У такий спосіб розв’язується одновимірна задача оптимізації. Метод пошуку оптимальних параметрів ілюструється точкою C на рис. 2.22.

Запропонований нами алгоритм такий.

1. Оберіть початкові значення: $q_1, q_2, q_3 \in Q$; розмір кроку: $h_0 \in R^+ \setminus \{0\}$; параметр: $\varepsilon_1 \in R^+ \setminus \{0\}$.

2. Починаючи з $i=1$, повторюємо рекурсію (2.104) і збільшуємо $h = k h_0$ при $I(q) \leq \varepsilon_1$, де k – ціла константа.

3. Укажіть q_1, q_2, q_3 оптимізацією (2.114) новий параметр $\varepsilon_2 \ll \varepsilon_1$.

Налаштування ПІД-контролера для нелінійного об’єкта. Розглянемо завдання керування бічним рухом квадрантора. Аналіз рівнянь (2.97)–(2.99) дає змогу встановити, що в постійний момент $u_1(t)$ і за відомих початкових станів $\varphi(0)$, $\theta(0)$, $\psi(0)$ у початковий час $t = 0$ рух квадрантора повністю визначається незалежними змінними $\varphi(t)$, $\theta(t)$. Координати $\psi(t)$ знаходять шляхом розв’язання рівняння

$$\psi(t) = \psi(0) + \iint u_1 dt^2. \quad (2.115)$$

Стабілізація координати $\psi(t)$ можлива, якщо $u_1(t)$ встановлено на постійне значення, тобто $u_1(t) = \text{const}$. Введемо такі позначення

$$\omega = \frac{I-I_3}{I} \dot{\psi}; \quad \Phi = \dot{\varphi}; \quad \Theta = \dot{\theta}, \quad m = \frac{c}{I}, \quad (2.116)$$

тоді рівняння (2.97), (2.98) можна переписати як

$$\dot{\Phi}(t) = \omega \theta(t) - \frac{J_r}{I} \theta(t) \Omega + m u_2(t) = \omega' \theta(t) + m u_2(t); \quad (2.117)$$

$$\dot{\Theta}(t) = -\omega \Phi(t) + \frac{J_r}{I} \Phi(t) \Omega + m u_3(t) = -\omega' \Phi(t) + m u_3(t), \quad (2.118)$$

де $\omega' = \omega - \frac{J_r}{I} \Omega$ і рівняння (2.11)–(2.13) не змінюються. Тоді модель квадروتора (2.11)–(2.15) і (2.97), (2.98) у задачі визначення оптимальних параметрів ПД-контролера перетворюється в модель (2.35)–(2.37), (2.117), (2.118).

Відомі способи знаходження $\partial I / \partial q$ для систем автоматичного керування ґрунтуються на знанні передавальних функцій. Передавальна функція, що відповідає моделі (2.111), (2.112) на одному каналі управління, може бути записана як

$$W_{\Phi_u}(s) = \frac{ms}{s^2 + (\omega')^2}, \quad (2.119)$$

також як [42].

Компоненти вектора $\partial I / \partial q$ будуть знайдені методом допоміжного оператора, тобто

$$\frac{\partial I}{\partial q} = \frac{\partial I}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial q}, \quad (2.120)$$

де

$$\frac{\partial e}{\partial q} = -W_{sup}(p, q) \frac{\partial W_c}{\partial q} e; \quad (2.121)$$

і

$$W_{sup}(p, q) = \frac{W_0}{1 + W_c(p)W_0(p)}. \quad (2.122)$$

Підхід (2.120) – (2.122) має аналітичний розв'язок.

Аналітичне рішення. Нехай об'єкт, вказаний у формі (2.113), буде керований контролером типу PD, тоді $W_{sup}(p, q)$ має вигляд

$$W_{sup}(p, q) = \frac{m}{p^2 + b(q)p + c(q)}, \quad (2.123)$$

де $b = mq_2$, $c = mq_1 + (\omega')^2$. Контроль реалізовується у часовій області. Перехід до часової області здійснюється виконанням зворотного перетворення Лапласа

(2.117). Беручи до уваги різні варіанти коренів для характеристичного рівняння (2.117), маємо три можливих розв'язки:

$$L^{-1}\{W_{sup}(p)\} = me^{-\alpha t} \sin(\beta t) / \sqrt{|D|} \quad (2.124)$$

у випадку складних коренів;

$$L^{-1}\{W_{sup}(p)\} = mte^{-\alpha t} \quad (2.125)$$

у випадку реальних множинних коренів;

$$L^{-1}\{W_{sup}(p)\} = \frac{1}{2}m(e^{(-\alpha+\sqrt{D})t} - e^{(-\alpha-\sqrt{D})t})/\sqrt{D} \quad (2.126)$$

у випадку різних реальних коренів, де $\alpha = b/2$, $\beta = \sqrt{D}$.

З (2.115) та з (2.95) отримаємо

$$\frac{\partial W_c}{\partial q_1} = 1; \quad \frac{\partial W_c}{\partial q_2} = q_2. \quad (2.127)$$

Числовий розв'язок. Оскільки розв'язок в аналітичній формі не завжди можна отримати, більше того, точна математична модель установки не відома, доцільно отримати напрямок градієнта функції ∇f_l у числовій формі, наприклад, за допомогою засобів результатів вимірювань.

Для цього використовуємо визначення градієнта, у якому зазначається, що градієнт – вектор, спрямований на найбільше збільшення функції, а його координати визначаються частковими похідними щодо параметрів управління. Отже, оцінка координатного вектора градієнта визначається виразами

$$\frac{\partial I}{\partial q_l} = \frac{1}{2\Delta q_l} [I(q_l + \Delta q_l) - I(q_l - \Delta q_l)], \quad (2.128)$$

де $I(q_l + \Delta q_l)$, $I(q_l - \Delta q_l)$ – виміряні значення функціонала якості (2.103) під час корекції l -го кроку.

Моделювання. Для математичної моделі квадрантора, поданого виразами (2.113), (2.114), алгоритм налаштування моделювався з використанням запропонованого алгоритму, тобто відповідно до виразів (2.105), (2.112), (2.113).

Вихідними даними для математичної моделі є $m = 1 \text{ (V}\cdot\text{sec)}^{-1}$, $\omega' = 5 \text{ rad/sec}$. Початкові параметри контролера PD є $q_1 = 2 \text{ rad/V}$, $q_3 = 2 \text{ sec}$. Реакція моделі на одиничний крок на початковій ітерації налаштування має вигляд, показаний на рис. 2.23.

Попереднє оцінювання кількості кроків давало число $r \leq 1000$. В результаті процедури налаштування були отримані наступні параметри контролера PD: $q_1 = 8,2936 \text{ rad/V}$, $q_3 = 0,253 \text{ sec}$. Перехідну характеристику системи управління з цими параметрами контролера подано на рис. 2.24.

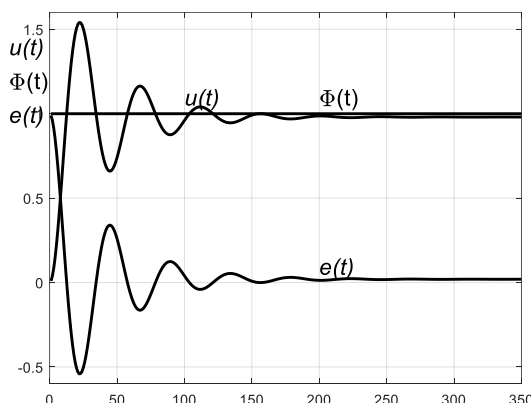


Рис. 2.23. Функції $u(t)$, $\Phi(t)$ і $e(t)$ системи на початковому етапі налаштування системи

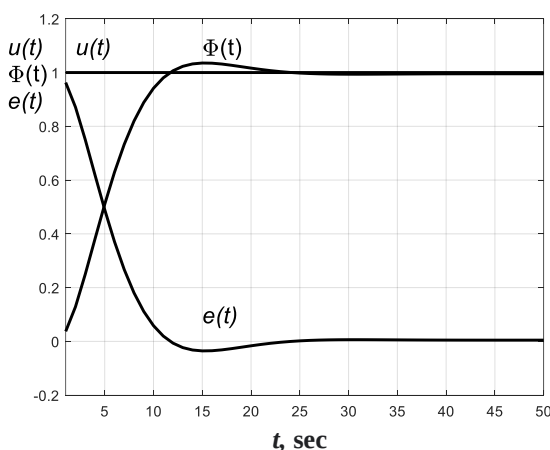


Рис. 2.24. Функції $u(t)$, $\Phi(t)$ і $e(t)$ системи на останньому етапі налаштування

Для налаштування контролера було достатньо шести ітерацій. Графік функціонала якості (2.103) зміни в процесі регулювання і зміни параметрів налаштування контролера показано на рис. 2.25, 2.26

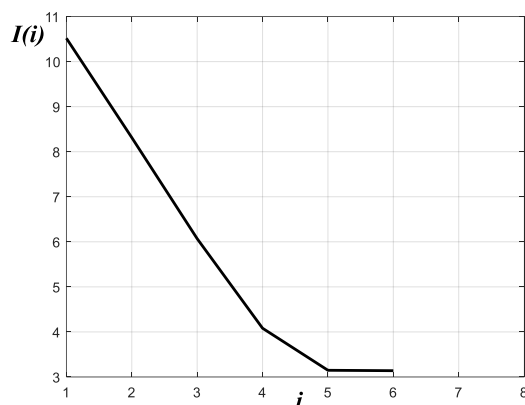


Рис. 2.25. Графік якості функціонала $I(i)$ у процесі налаштування

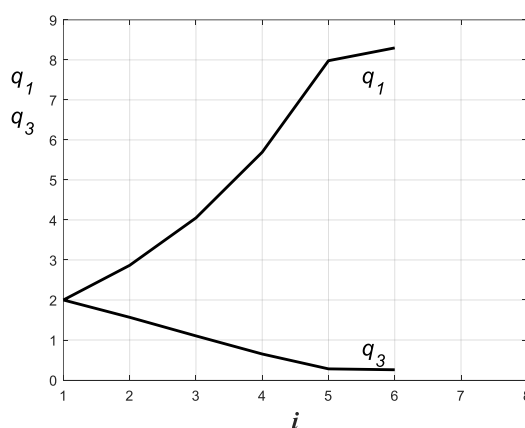


Рис. 2.26 Графік значень коефіцієнтів q_1 , q_3 контролера в процесі налаштування

Установлення такої моделі за допомогою Simulink MatLab (рис. 2.27) дало можливість оцінити основні параметри перехідного процесу під час пошуку оптимальних параметрів контролера.

Порівняння рис. 2.24 і 2.27, а також аналіз табл. 2.3 показує, що якісно перехідні процеси майже однакові. З погляду тимчасових параметрів, перехідний процес, отриманий у Simulink, швидший, але швидкість перевищення втричі перевищує значення, отримане за допомогою запропонованого алгоритму. Окрім того, запропонований алгоритм швидше знаходить задовільні показники перехідного процесу.

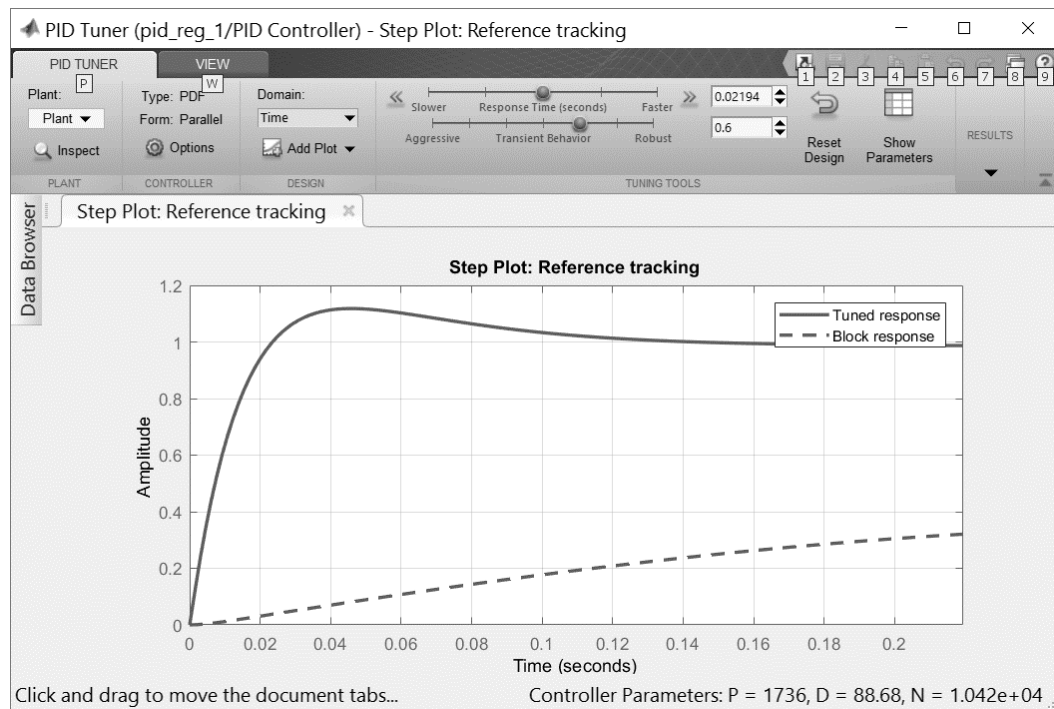


Рис. 2.27. Вікно аналізу моделі MatLab Simulink

Порівняння результатів моделювання наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Результати порівняння

Параметри	Запропонований алгоритм	Simulink
q_1 , rad/V	8,2936	1736
q_3 , с	0,253	88,68
Час зростання, с	1,1	0,0164
Час налаштування, с	2	0,132
Перевищення, %	4	13,4

Запропоновано новий алгоритм налаштування контролерів PD-типу градієнта для керування рухом квадрантора [79]. У роботі виконано оцінювання максимальної кількості поправок під час пошуку оптимальних параметрів контролера. Порівняння запропонованого алгоритму на основі градієнтного підходу з вбудованим алгоритмом пакету Simulink показало кращу швидкість збіжності запропонованого алгоритму налаштування відповідно до розробленої математичної моделі керування бічним рухом [80]. Подальші дослідження цього алгоритму налаштування ПІД-регуляторів планується розглянути в умовах перешкод шуму в каналах вимірювання координат.

2.6. Синтез системи стабілізації руху БПЛА на програмних траєкторіях

Режими стабілізації руху БПЛА на програмних траєкторіях є одними з найпоширеніших у наш час. Питання реалізації законів управління для таких режимів досить добре відоме та опрацьоване. Це пов'язано насамперед з наявністю потужних обчислювальних методів синтезу: принципу максимуму Л. С. Понтрягіна, динамічного програмування Р. Беллмана, аналітичного конструювання А. М. Лєтова, Р. Калмана, О. А. Красовського та ін. Однак комплексне впровадження цих методів стримується деякими труднощами, пов'язаними з необхідністю поєднання якостей теоретика, інженера та програміста під час створення тренажерів БПЛА. Останнім часом сформовано конкретні шляхи подолання вказаних проблем, пов'язані з подальшою універсалізацією (наближенням до користувача) мов програмування та діалогових засобів спілкування з ЕОМ і, нарешті, розробленням та впровадженням пакетів прикладних програм та систем автоматизованого проєктування. Залежно від поставлених завдань ці пакети можуть створюватись різних типів і різного рівня складності. Однак їх відмінною ознакою повинна залишатись простота роботи з ними через ЕОМ на доступній розробнику тренажера мові.

Пропонується використовувати методику синтезу та сам пакет прикладних програм з розрахунку системи автоматичної стабілізації БПЛА на базі методів аналітичного конструювання оптимальних регуляторів за критерієм «узагальненої роботи» О. А. Красовського.

Розглянемо математичну модель БПЛА як динамічний об'єкт лінеаризований відносно програмної траєкторії польоту:

$$\Delta \dot{X} = a\Delta X + b\Delta U, \quad (2.129)$$

де $\Delta X = X - X_{\text{зад}}$, $\Delta U = U - U_{\text{зад}}$ – відхилення (вектори) фазових координат об'єкта від деяких програмних значень $X_{\text{зад}}$, $U_{\text{зад}}$;

a , b – матриці стану ($n \times n$) та ефективності управління ($n \times m$) відповідно.

Доведено, що управління ΔU , які дають мінімум функціоналу загальної роботи

$$I \int_a^\infty (x^T \beta x + \Delta U^T K^{-2} \Delta U + \Delta U_{\text{опт}} K^{-2} \Delta U_{\text{опт}}) dt, \quad (2.130)$$

мають вигляд:

$$\Delta U = -k^2 b^T \Gamma \Delta x, \quad (2.131)$$

де Γ – симетрична матриця оптимальних управлінь – розв’язок матричного рівня Ляпунова

$$\Gamma \alpha + \alpha^T \Gamma = -\beta. \quad (2.132)$$

Одним з недоліків цього методу оптимізації є напіввизначеність формування функціонала якості I (матриця K^{-2} визначається після розв’язання рівняння Ляпунова) і невизначеність критеріїв задання матриці β . Це призводить до необхідності організації ітераційного процесу синтезу з вибором цих коефіцієнтів та багаторазовим розв’язанням рівняння Ляпунова.

Даний алгоритм реалізований у програмі CONTROL. Під час реалізації даного алгоритму основні обчислювальні труднощі виникають у разі багаторазового розв’язання матричного рівняння Ляпунова.

Алгоритми розв’язання рівняння Ляпунова. Нині існує досить велика кількість числових алгоритмів розв’язання матричного рівняння Ляпунова. Усі вони за принципом організації обчислювальних процедур можуть бути умовно розбиті на два великих класи: прямі та ітераційні. Перші пропонують перетворення первинного рівняння в систему звичайних алгебричних рівнянь та розв’язок її будь-яким відомим методом. Другі ґрунтуються на організації розв’язання рівняння методом ітераційного наближення до істинного значення. Розглянемо два найефективніших алгоритми з цих класів.

Алгоритм 1. Початкове рівняння $\Gamma \alpha + \alpha^T \Gamma = -\beta$, зводиться до вигляду $Ax = -\beta$, де β – вектор-стовпчик, складений зі стовпців матриці β без повторюваних елементів, розмірності $\frac{1}{2}$ та $(n+1)$; x – шуканий вектор-стовпець, складений

аналогічно з елементів матриці Γ ; A – квадратна матриця $1/2 n(n+1) * 1/2 n(n+1)$, яка формується з елементів матриці a за такими правилами:

$$A_{v\mu} = \begin{cases} 2alk, i = k, i = j; \\ 2aji, i = k, i \neq j, i = l; \\ 0, i = k, i \neq j, i \neq l; \\ a_{ii} + a_{kk}, i \neq k, i = j, k = l; \\ a_{lk}, i \neq k, i \neq j, k \neq l; \\ a_{jk}, i \neq k, i \neq j, i = l; \\ a_{li}, i \neq l, i \neq k, k \neq l, k = j; \\ 0, i \neq j, i \neq l, l \neq k, k \neq j; \\ v = (i-1)n - \frac{1}{2}i(i-1) + k; i = 1.2 \dots n; k = i, i+1, \dots n; \\ \mu = (j-n)n - \frac{1}{2}j(j-1) + l; j = 1.2 \dots n; l = j, j+1, \dots n. \end{cases} \quad (2.133)$$

Даний алгоритм реалізований у програмі KAOUS.

Алгоритм 2. Відомо [81, 82], що у випадку стійкої матриці a , розв’язок матричного рівняння Ляпунова може бути поданий у вигляді такого інтеграла:

$$\Gamma = \int_a^\infty e^{a^T t} * B * e^{at} dt, \quad (2.134)$$

де e^{at} – матрична експонента розмірності $(n \times n)$ (програма KVADR).

Для знаходження цього інтеграла пропонується [83, 84] така ітераційна процедура:

$$\Gamma_{K+1} = (cT)^{2^K} \Gamma_R C^{2^K} + \Gamma_K, \quad (2.135)$$

де $C = e^{a\Delta t}$, Δt – крок чисельного інтегрування;

$\Gamma = \int_0^{\Delta t} e^{a^T \tau} * B * e^{a\tau} dt$ – початкове наближення.

Цей алгоритм реалізований у програмі WESOV.

Результати порівняльного дослідження цих алгоритмів показують, що перший кращий для об’єктів невеликої розмірності ($n \leq 5$) у зв’язку з різким

зростанням обсягом потрібної пам'яті EOM і погіршенням точності. Другий – ефективніший для об'єктів високої розмірності. Тут він точніший і потребує менше пам'яті.

Опис пакету прикладних програм. Пакет прикладних програм, який реалізовує поставлену задачу, написаний алгоритмічною мовою C++ і містить управляючу головну програму CONTROL і ряд підпрограм.

Підпрограми: DEMOS – підпрограма перетворення масивів для програм, де вони описані різною розмірністю; HPCG – стандартна програма розв'язку диференціальних рівнянь із системи математичного забезпечення (CM3) EOM; PRAV, OBR – підпрограма формування правих частин диференціальних рівнянь і виведення результатів до друку; KAOVS, WESOV – підпрограми розв'язку рівнянь Лопухова прямим та ітераційним методами; KVADR – підпрограма знаходження матричної експоненти; MINV – стандартна програма звертання матриці з CM3 EOM.

2.7. Синтез адаптивної системи управління об'єктом за умов невизначеності

В останні три десятиліття в теорії адаптивних систем управління почав розвиватися нестохастичний підхід, заснований на припущенні про те, що збурення, що не вимірюється, не задовольняє жодним іншим умовам регулярності за винятком обмеженості, а вектор невідомих параметрів об'єкта (оптимального регулятора) належить відомій обмеженій множині, яка вважається опуклою та замкнутою. Основні результати, отримані у цьому напрямку, наведено у монографіях [85–91]. Слід зазначити, що алгоритми адаптивного керування для термінальних систем розвивалися лише для випадків впливу на систему випадкових стохастичних дій. Однак алгоритми, які дають змогу розв'язувати термінальні задачі для об'єктів з невідомими параметрами та наявністю нестохастичних перешкод у каналах вимірювання координат, судячи з наявної інформації, не розроблялися [92, 93].

Найбільш вивченим класом адаптивних систем управління вважаються безпошукові та пошукові адаптивні системи, що забезпечують необхідну якість регулювання в контурах автоматичної стабілізації та стеження за змінами характеристик середовища та об'єкта [94, §10.1].

У пошукових системах деякий показник якості має деяку нестабільну (невідому) залежність від деяких вхідних змінних. Завданням системи є підтримка цього показника рівного екстремального значення за допомогою зміни вхідних величин системи. Причинами, що викликають необхідність налаштування, є зміна впливів на систему та відхилення параметрів об'єктів від оптимальних значень. Відхилення можуть виявлятися організацією пробних рухів системи з подальшим аналізом вихідної інформації, що виробляється, або за допомогою аналізу робочих сигналів.

Перший спосіб реалізовується за допомогою застосування спеціальних пошукових рухів (пробних сигналів), другий – з огляду на аналітичні розрахунки, проведених обчислювальним пристроєм.

Найефективнішими є безпошукові методи, що характеризуються гарною швидкодією та точністю. Ці методи будуються за схемами прямого чи непрямого адаптивного управління (див., наприклад, [94, с. 469]). У разі прямого адаптивного управління в процесі роботи системи вимірюються деякі характеристики моделі та системи, які надалі використовуються для корегування параметрів регулятора, що настраюються з метою подальшого зведення їх до нуля або малої допустимої величини. За непрямого (ідентифікаційного) адаптивного управління проводиться попередня ідентифікація об'єкта, далі за оціночними параметрами обчислюються параметри регулятора [85, 94, 95].

Розрізняють адаптивні системи, в яких у кожен момент t у процесі управління уточняється єдиний набір оцінок невідомих параметрів об'єкта або оптимального регулятора, що утворює вектор параметрів c_t [86], що підлаштовуються, і адаптивні системи, у яких здійснюється уточнення множини Ξ_t оцінок відповідних параметрів [85, 96].

Структура типової адаптивної системи стабілізації об'єкта в умовах невимірюваних збурень ξ_t з використанням для керування точкових оцінок c_t показана на рис. 2.28.

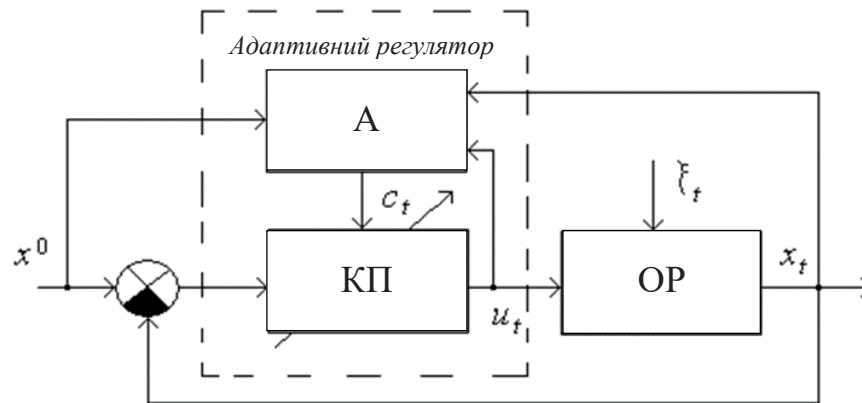


Рис. 2.28. Структура адаптивної системи керування

Адаптивний регулятор побудований за ієрархічним принципом, відповідно до якого регулятор розбитий на рівні. На верхньому рівні розташовано пристрій, що реалізує безпосередньо алгоритм адаптивного управління А (адаптер), який змінює вектор параметрів керуючого пристрою (КП), що настраюються, розташованого на нижньому рівні [86].

Керуючий пристрій, реалізований за принципом зворотного зв'язку, формує керуючі дії так, щоб компенсувати поточні помилки системи. Алгоритм нижнього рівня виражений у вигляді операторного рівняння

$$u_t = f(u_{t-1}, \theta_t, c_t), \quad (2.136)$$

де $\theta = x_0 - x_t$ — значення поточної помилки системи, яке називають алгоритмом (законом) управління. Алгоритм верхнього рівня, який у символічній формі може бути поданий так:

$$c_t = F(x^0, x_t, u_{t-1}, c_{t-1}), \quad (2.137)$$

називають алгоритмом (законом) адаптації. Для реалізації закону адаптивного управління потрібна інформація про вплив, що дає поточне значення управляючого впливу, що формується на підставі попередніх значень вектора параметрів, реакції об'єкта на ці впливи.

Рівняння (2.111), (2.112) визначають алгоритм адаптивного керування. Об'єкт разом із пристроєм, що управляє, утворюють основний контур регулятора, а ланцюг зворотного зв'язку, що містить адаптер, утворює контур адаптації. З огляду на вимоги практичної реалізованості, для формування управління u_t і визначення вектора параметрів s_t , що підлаштовуються, зазвичай використовують кінцеву частину передісторії процесу налаштування параметрів.

Завдання синтезу адаптивної системи управління полягає у тому, щоб побудувати регулятор (2.111), (2.112), який забезпечує досягнення однієї з цілей функціонування системи. Виконання цього завдання відповідно до методології, запропонованої в [95, п.1.3.1; 86, п. 7.1.1], складається з чотирьох етапів.

Етап 1. Вибір структури регулятора. На цьому етапі розв'язується оптимізаційна задача за наявності невимірюваного збурення в неадаптивній постановці (знаходять закон оптимального управління об'єктом у припущенні, що його структура та параметри відомі). Як наслідок, визначають структуру основного контуру адаптивної системи, побудовану за схемою (див., наприклад, [97]).

Етап 2. Вибір параметрів, що підлаштовуються. На цьому етапі невідомий вектор параметрів об'єкта (під час використання ідентифікаційного підходу) або параметри оптимального регулятора (у разі використання прямого підходу) замінюють відповідним вектором параметрів, що підлаштовуються (поточних оцінок). Результатом цього етапу є побудова закону управління.

Етап 3. Синтез алгоритму адаптації. Цей закон передбачає побудову рекурентної процедури отримання послідовності оцінок. Етап завершується одержанням алгоритму (2.111), (2.112), що дає змогу визначити структуру контуру адаптації у схемі на рис. 2.28.

Етап 4. Обґрунтування працездатності адаптивного регулятора. Тут потрібно показати, що синтезована система дійсно адаптивна (поставлена мета управління досягається за будь-якого значення вектора c_t і будь-яких значень x_t).

2.8. Синтез адаптивної системи термінального управління

Завдання синтезу систем термінального управління в умовах неповної апріорної інформації формулюється так:

- визначити керуючий вплив у системі, математична модель якої подається системою з n диференціальних рівнянь з апріорі невідомими параметрами, що забезпечує переведення фазових координат x_i зображеної точки $X(x_1, \dots, x_n)$, що характеризують вихідну величину, швидкість, прискорення, а також вищі похідні вихідної величини, і контрольованих за допомогою фізично реалізованих датчиків стану системи, в деяку досить малу область кінцевого положення за мінімально можливий час.

Передбачається, що в системі відомо:

1. Початковий стан $X(t_0)$, який може перебувати в області V , t_0 – початковий момент часу дослідження системи:

$$X(t_0) \in V = [\underline{x}_1, \bar{x}_1] \times \dots \times [\underline{x}_n, \bar{x}_n]. \quad (2.138)$$

2. Кінцевий стан системи $X(t_k) \in \Omega$ - точка з координатами $(0, \dots, 0) \in \Omega$, причому $\Omega \in V \setminus X(t_0)$.

3. Параметри моделі, які можуть перебувати в інтервалах

$$0 < \underline{c}_i \leq c_i \leq \bar{c}_i. \quad (2.139)$$

4. Вимірювання вихідних координат системи являє адитивну суміш вихідної координати x_i і сигналу ξ_i

$$x_i^* = x_i + \xi_i, \quad (2.140)$$

де ξ_i – нестохастична, обмежена за рівнем завада, $|\xi_i(t)| \leq N_i$; де N_i – рівень обмежень i -го каналу обмеження, апріорі відомий, $i = \overline{1, n}$.

Передбачається, що керуючий вплив у системі повинен знаходитися тільки за інформацією про поточну поведінку системи, який сформований за керуючими сигналами за допомогою спеціального управляючого пристрою.

Розв’язок задачі в цій постановці невідомий. Повний перебір всіх можливих варіантів вихідних даних, у разі прямої підстановки, в рівняння регулятора нереальний. Тому доцільним є використання ітераційно-пошукових алгоритмів з деяким збільшенням, що задовольняє умову задачі.

Центральним завданням у розв’язанні проблеми є побудова високоефективних систем термінального управління з апріорі невідомими параметрами регулятора на основі єдиної методології, розробленої унаслідок теоретичного і дослідно-експериментального дослідження.

Розглянута проблема підвищення ефективності систем термінального управління розв’язується в кілька етапів:

I етап – розв’язання задач формування вимог до системи термінального управління.

II етап – розв’язання задач побудови квазіоптимальних за часом перехідного процесу систем термінального управління, коли відомі деякі наближені вихідні дані.

III етап – розв’язання прямої задачі адаптації термінальної системи управління як за відсутності, так і за наявності шумів у каналах вимірювання фазових координат.

IV етап – ідентифікаційний підхід до виконання завдання адаптації термінальної системи управління за наявності шумів у каналах вимірювання фазових координат.

V етап – пошук методів пришвидшення збіжності (удосконалення) розроблених алгоритмів адаптації, наприклад, на основі інтеграції розроблених методів.

Зміст завдань побудови адаптивної системи управління і етапність їх виконання визначають спрямованість дослідження проблеми підвищення ефективності систем термінального управління. Зазначимо, що зміст етапу I належить до тактико-технічних аспектів проблеми, тому основну увагу в роботі приділено дослідженню II, III, IV і V етапів розв'язання задачі адаптації системи термінального управління.

2.8.1. Способи та методи розв'язання проблеми підвищення динамічних характеристик

Термінальне управління повинно здійснюватися за функціями часу або координатами стану. У зв'язку з цим обов'язковим є зворотний зв'язок і вимірювання фазових координат системи. Засоби контролю й вимірювання фазових координат, особливо їх похідних, неточні і мають певні похибки, які пісумовуються з похибками формування математичної моделі системи, ще більш віддаляють отриману модель від ідеальної.

Алгоритм термінального управління динамічним об'єктом вимагає формування перемикачів керувальних впливів зазвичай максимальної величини за певним законом. Елементи, що застосовуються під час реалізації цих алгоритмів, являють собою різного типу компаратори, контактні і безконтактні перемикачі. Характеристиками цих пристроїв є зони нечутливості, гістерезис, кінцевий час перемикачів, тобто параметри, що зумовлюють неточну реалізацію моментів перемикачів управління відповідно до отриманого алгоритмом. Реальні пристрої управління мають обмеження за амплітудою і потужністю управління.

Найважливішим фактом створення близьких до термінальних систем динамічних об'єктів є складність алгоритмів, які використовуються системою управління, що потребують значного часу для налаштування систем. Тому одним

із завдань проектування стає пошук компромісу між простотою алгоритму і можливим задоволенням вимог до якості системи. Це має сенс під час створення дорогих об'єктів управління, коли простота і характеристики системи неадекватні витратам на створення такого об'єкта.

Отже, розглянутий цілий комплекс причин, унаслідок яких виникає необхідність побудови систем, близьких до термінальних. В даний час існує три принципи побудови близьких до термінальних систем: спрощення алгоритму управління динамічним об'єктом; визначення алгоритму оптимального управління об'єктом з попередньо спрощеною математичною моделлю; наближення до оптимальної системи управління об'єктами введенням нелінійних елементів і зміною структури системи.

Перевага першого принципу полягає у встановленні відмінностей квазіоптимальних процесів від оптимальних. Дуже важливим є вибір критерію наближення квазіоптимального алгоритму управління до оптимального. Такими критеріями можуть бути відхилення процесу зміни координат стану від оптимального в середньому, різниця між екстремальним значенням функціонала і значенням цього функціонала, відповідним квазіоптимальному алгоритму та ін.

Методика спрощення алгоритму оптимального управління зводиться до апроксимації строго оптимальних функцій управління і полягає в такому. Нехай є гіперповерхня, що розділяє області координатних станів, що належать керувальним впливам протилежних знаків, яку необхідно визначити. Водночас апроксимація гіперповерхні не повинна істотно погіршити якість функціонування об'єкта. Під час апроксимації окремих функцій управління можна користуватися такими правилами.

1. Зменшити кількість інтервалів управління. Це пов'язано з необхідністю зниження порядку диференціального рівняння моделі об'єкта, наприклад, вилученням ланок з малими сталими часу.

2. Вважати, що вектор стану об'єкта повинен потрапити не в точку, а в деяку задану область фазового простору, що має відповідні допуски. Це дає можливість

нехтувати останніми інтервалами управління, а загалом скоротити кількість інтервалів управління.

3. У разі досягнення області доступності керувальний вплив може змінюватися (зменшуватися) для забезпечення попадання вектора стану у вузьку область.

З можливих підходів до розв'язання цього питання можна виокремити такі: знаходження виразів функцій, що визначають поверхні в просторі координат стану і збігаються з функцією, яка відповідає поверхні на деяких дискретних множинах (на незбіжних точках обчислюється наближеними методами); розкладання в ряди за відомими функціями; розкладання в ряди за невідомими функціями, які підбираються за умови найкращого наближення до критерію якості функціонування; апроксимацію функції оптимального управління класом еквівалентних за знаком функцій.

Сутність другого принципу квазіоптимізації полягає в спрощенні математичної моделі об'єкта шляхом лінеаризації або відкидання нелінійностей і пониження порядку диференціального рівняння до другого або третього. Однак після спрощення необхідно оцінити ступінь невідповідності поведінки об'єкта бажаному, що дасть змогу коригувати пристрій управління. Під час спрощення моделі об'єкта виникає питання про якісні показники синтезованої системи оптимального управління, що розв'язується позитивно в разі близькості перехідних процесів спрощеної і вихідної систем. Як критерії оцінювання близькості спрощеної моделі до вихідної можуть слугувати критерії наближення перехідних функцій і частотних характеристик.

2.8.2. Критерії якості моделі

Математично перший критерій подається інтегралами

$$I_1 = \int_0^{\infty} \delta_h^2(t) dt ; \quad (2.141)$$

$$I_2 = \int_0^{\infty} \varepsilon_y(t) dt, \quad (2.142)$$

де $\delta_h(t)$ – помилка в перехідній функції, що виникає під час підстановки точного розв’язку в рівняння спрощеної моделі; $\varepsilon_y(t)$ – різниця між точним розв’язком і наближенням.

Другий критерій виражається як [98, 99]

$$I_3 = \int_0^{\infty} \varepsilon_y^2(t) dt. \quad (2.143)$$

Його можна записати у вигляді формули Рейлі

$$I_3 = \frac{1}{2\pi j} \int_0^{\infty} |E(j\omega)|^2 d\omega, \quad (2.144)$$

де $E(j\omega)$ – зображення Фур’є-функції $\varepsilon_y(t)$.

Висновки до розділу 2

1. Синтезовано математичні моделі дистанційно пілотованих літальних апаратів та визначено особливості їх параметрів. Для синтезу математичної моделі БПЛА літакового типу запропоновано технологію врахування аеродинамічних характеристик літака, яка передбачає три етапи: перший – врахування характеристик (параметрів) самого літака (модель датчиків первинної інформації, електроприводів органів керування) та динаміки його руху; другий – врахування параметрів навколишнього середовища: температура, густина повітря, тиск, турбулентна атмосфера (модель Драйдена); третій – врахування особливостей оператора ДПЛА.

2. Результати порівняльного дослідження алгоритмів розв’язання матричного рівняння Ляпунова показують, що перший кращий для об’єктів невеликої

розмірності ($n \leq 5$) у зв'язку з різким зростанням обсягу потрібної пам'яті ЕОМ і погіршенням точності. Другий – ефективніший для об'єктів високої розмірності, точніший і потребує менше пам'яті.

3. Удосконалено алгоритм управління БПЛА типу квадروتора зі стабілізувальними кутовими координатами за допомогою оптимального за часом керування. Цей алгоритм передбачає, що основні параметри квадروتора відомі і вимірюються його кутові координати руху. На відміну від інших законів управління, ми пропонуємо закон управління типом комутації. Основні можливості закону управління сформульовані в наслідках. Аналітично встановлено оптимальний для часу закон управління та залежність мінімальної кількості перемикального керувального сигналу та початкових умов динамічної системи. Процес моделювання руху БПЛА доводить правильність закону управління, який запропоновано у роботі.

4. Розроблено новий алгоритм стабілізації кутового положення квадрокоптера за допомогою процедури зворотного кроку, який, на відміну від відомих, під час налаштування унеможливорює метод спроб і помилок. Визначено залежності якості керування від параметра процедури зворотного кроку. Також запропоновано алгоритм вибору відповідного значення цього параметра шляхом процедурно-спрямованого пошуку.

5. Побудовано новий алгоритм налаштування PD-контролерів градієнтного типу для керування рухом квадروتора. Виконано оцінювання максимальної кількості поправок під час пошуку оптимальних параметрів контролера. Порівняння запропонованого алгоритму на основі градієнтного підходу з вбудованим алгоритмом пакету Simulink показало кращу швидкість збіжності цього алгоритму налаштування відповідно до розробленої математичної моделі керування бічним рухом. Подальші дослідження зазначеного алгоритму налаштування ПД-регуляторів розглянутимуться в умовах перешкод шуму в каналах вимірювання координат.

Список використаних джерел до розділу 2

1. Pounds P., Hynes P., Mahony R. & Roberts, J. Design of a Four-Rotor Aerial Robot, *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation*, Auckland, New Zealand, 2002, Vol. 1, pp. 145–150, 2002, November, available online: URL: https://www.researchgate.net/publication/229001549_Design_of_a_four-rotor_aerial_robot, last visit: 26.07.2018.

2. Castillo P., Dzul A. & Lozano, R. Real-time stabilization and tracking of a four-rotor mini-robotcraft, *Proceedings of the IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Vol. 12. No. 4, 2004, pp. 510–516, available online: URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1308180/>, last visit: 26.07.2018.

3. Babaei R. & Ehyaei, A.F. Robust Backstepping Control of a Quadrotor UAV Using Extended KalmanBucy Filter, *International Journal of Multidisciplinary Engineering in Current Research*, 2015, 5(16), 2276–2291, available online: URL: https://en.civilica.com/Paper-JR_IJMEC-JR_IJMEC-5-16_006=Robust-Backstepping-Control-of-a-Quadrotor-UAV-Using-Extended-Kalman-Bucy-Filter.html, last visit: 26.07.2018.

4. Muslimov T. Z., Munasypov R. A. Consensus-based cooperative control of parallel fixed-wing UAV formations via adaptive backstepping. *Aerospace Science and Technology*, 109, art. No. 106416. 2021. DOI: 10.1016/j.ast.2020.106416 URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85097776881&doi=10.1016%2fj.ast.2020.106416&partnerID=40&md5=e61056af9b41be95a3631f99c0a67437>.

5. Larin, V. B. & Tunik, A.A. Synthesis of the Quad-Rotor Flight Control System, *Proceedings of the International Conference Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. 2016. International Conference of (Vol. 1, pp.12–17) IEEE, 2016, available online: URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7783095/>, last visit: 26.07.2018.

6. Noura H., Susilo T.B. & Wahyudie A. Robust PID-controller for quad-rotors, *Journal of Unmanned System Technology*, 1: 14–19, 2013, available online:

https://www.researchgate.net/publication/272550330_Robust_PID_Controller_for_Quadrotors, last visit: 26.07.2018.

7. Sen Y. & Zhong-Sheng W. Quad-Rotor UAV Control Method Based on PID Control Law, *Proceedings of the International Conference on Computer Network, Electronic and Automation (ICCNEA)*, Xi'an, China, 23–25 September 2017, pp. 418 – 421, available. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8128600/>, last visit: 26.07.2018.

8. Sushchenko O. A & Goncharenko V.A. Design of Robust Systems for Stabilization of Unmanned Aerial Vehicle Equipment”, *International Journal of Aerospace Engineering*, Article ID 6054081, 2016, p. 1–10, available online: <https://doi.org/10.1155/2016/6054081>.

9. Liu H., Lyu Y., Zhao W. Robust visual servoing formation tracking control for quadrotor UAV team. *Aerospace Science and Technology*, 106, 2020, art. No. 106061. DOI: 10.1016/j.ast.2020.106061. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85088753595&doi=10.1016%2fj.ast.2020.106061&partnerID=40&md5=dc59040d71a3bc02873d18dab365e602>.

10. Athans M. & Falb P.L. Optimal Control. An Introduction to the Theory and Its Applications, McGraw-Hill Book Company. 1963, pp. 451–589.

11. Kucherov, D.P. Synthesis of an adaptive controller for fixed-time control of a spinning body under the presence of bounded noise. *Journal of automation and information science*. Vol. 37. Is. 1. 2005, pp. 29–38, available online: URL: <http://www.dl.begellhouse.com/ru/journals/2b6239406278e43e,5aa280c9630a07e4,55b990ef5fa0b065.html>, last visit: 26.07.2018.

12. Goldstein H., Classical Mechanics, Addison-Wesley Publishing Company Inc. Reading, Mass, 3ed, 2001, pp. 184–232.

13. Kucherov D., Rasstrygin A., Sushchenko O., Zhdanov S., Kozub A. Synthesis of the switching control law for a quadrotor autopilot. *International Journal of Engineering & Technology*. Vol. 7. No 4, 2018, pp. 3065–3068. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.16368 (проіндексовано в базі даних Scopus).

14. Ullah S., Mehmood A., Khan Q., Rehman S. and Iqbal J. Robust Integral Sliding Mode Control Design for Stability Enhancement of Under-actuated Quadcopter. *International Journal of Control, Automation and Systems*. Vol. 18, 2020 pp. 1671–1678. DOI: 10.1007/s12555-019-0302-3.
15. Wasim M., Ullah M. and Iqbal J. Taxi model of unmanned aerial vehicle: Formulation and simulation, 2018 *1st Int. Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG)*, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICPESG.2018.8384506.
16. Farid G., Hongwei M., Baqar A. H. and Liwei Q. Inverse dynamics based altitude/attitude control and stabilization of a quadrotor UAV, 2017 *9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, 2017, pp. 675–679. DOI: 10.1109/ICMIC.2017.8321540.
17. Herdjunanto S., Sandiwan A. P. and Cahyadi A. I. Quadrotor proportional-derivative regulation for nonzero set point on SO(3) with disturbance compensation, in *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 190, 2017, pp. 1–5. DOI:10.1088/1757-899X/190/1/012005.
- 18.. Sizykh V. N, Antoshkin S. B., Daneev R. A., Bakanov M. V., Livshits A. V., and Aleksandrov A. A. Analytical design of control system mathematical models for mobile robots based on the methods of inverse problems of dynamics and modal PID controllers, in *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 760, pp. 1–20, 2020. DOI:10.1088/1757-899X/760/1/012053.
19. Kuchеров D., Kozub A. and Rasstrygin A. Setting the PID Controller for Controlling Quadrotor Flight: a Gradient Approach, 2018 *IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, 2018, pp. 90–93. DOI: 10.1109/MSNMC.2018.8576294.
20. Wasim M., Ullah M. and Iqbal J. Gain-scheduled proportional integral derivative control of taxi model of unmanned aerial vehicles, *Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. et Énerg.* Vol. 64. No. 1, 2019, pp. 75–80.
21. Ahmad U., Ahsan M., Qazi A. I. and Choudhry M. A. Modeling of lateral dynamics of a UAV using system identification approach, *International Conference on*

Information and Communication Technologies (ICICT), 2015, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICICT.2015.7469479.

22. Wang Z. and Li J. 3D simulation of flight control system for quad tilt rotor UAV based on flightgear, in *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 440, pp. 1–9, 2020. DOI:10.1088/1755-1315/440/5/052056.

23. Colorado J., et al. Inertial attitude control of a bat-like morphing-wing micro air vehicle. *Bioinspiration & Biomimetics*. Vol. 8, No.1, 2013, pp. 1–25. DOI:10.1088/1748-3182/8/1/019502.

24. Barabash O., Dakhno N., Shevchenko H. and Sobchuk V. Integro-Differential Models of Decision Support Systems for Controlling Unmanned Aerial Vehicles on the Basis of Modified Gradient Method, 2018 *IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control* (MSNMC), 2018, pp. 94–97, DOI: 10.1109/MSNMC.2018.8576310.

25. Mashkov O. A., Sobchuk V. V., Barabash O. V., Dakhno N. B., Shevchenko H. V. and Maisak T. V. Improvement of variational-gradient method in dynamical systems of automated control for integro-differential models, *Mathematical modeling and computing*. Vol. 6. No. 2, 2019, pp. 344–357. DOI:10.23939/mmc2019.02.344.

26. Barabash O., Dakhno N., Shevchenko H. and Sobchuk V. Unmanned Aerial Vehicles Flight Trajectory Optimisation on the Basis of Variational Enequality Algorithm and Projection Method, 2019 *IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments* (APUAVD). 2019, pp. 136–139, DOI: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943869.

27. Vazquez R. and Krstic M. “aking a step back: a brief history of PDE backstepping, in 20th *World Congress The International Federation of Automatic Control*, 2017, pp. 4258–4262.

28. Alyoussef F. and Kaya I. A review on nonlinear control approaches: sliding mode control, back-stepping control and feedback linearization control, in *International Engineering and Natural Sciences Conference*, 2019, pp. 608–619.

29. Nasr M., et al. A comparative study on the control of UAVs for Trajectory tracking by MPC, SMC, Backstepping, and Fuzzy Logic controllers, 2018 *IEEE*

International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 2018, pp. 1–6, DOI: 10.1109/ICVES.2018.8519511.

30. Basri A., Danapalasingam K. A. and Husain A. R. Design and optimization of backstepping controller for an underactuated autonomous quadrotor unmanned aerial vehicle, *Transactions of FAMENA*. Vol. 38. No. 3, 2014, pp. 27–44.

31. Hassan S., Abdelmajid B., Mourad Z., Aicha S. and Abdenaceur B. PSO-Backstepping controller of a grid connected DFIG based wind turbine. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. Vol. 10. No. 1, 2020, pp. 856–867. DOI: 10.11591/ijece.v10i1.

32. Vafamand N. Adaptive Robust Neural-Network-Based Backstepping Control of Tethered Satellites With Additive Stochastic Noise, in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vol. 56. No. 5, 2020, pp. 3922–3930. DOI: 10.1109/TAES.2020.2985276.

33. Giuseppi A., Pietrabissa A., Cilione S. and Galvagni L. Feedback linearization-based satellite attitude control with a life-support device without communications. *Control Engineering Practice*. Vol. 90, 2019, pp. 221–230. DOI: 10.1016/j.conengprac.2019.06.020.

34. Fan L., Liu X. and Cai G. Attitude tracking and vibration control of membrane antenna satellite. *Journal of the Franklin Institute*. Vol. 357. No. 15, 2020, pp. 10584–10599. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2020.08.034.

35. Kartal Y., Subbarao K., Gans N. R., Dogan A. and Lewis F. Distributed backstepping based control of multiple UAV formation flight subject to time delays. *IET Digital Library*. Vol. 14. No. 12, 2020, pp. 1628–1638. DOI: 10.1049/iet-cta.2019.1151.

36. Zahraoui Y., Akherraz M., Fahassa C. and Elbadaoui S. Induction motor harmonic reduction using space vector modulation algorithm, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. Vol. 9. No. 2, 2020, pp. 452–465. DOI: 10.11591/eei.v9i2.1682.

37. Dbaghi Y., Farhat S., Mediouni M., Essakhi H. and Elmoudden A. Indirect power control of DFIG based on wind turbine operating in MPPT using backstepping

approach, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. Vol. 11. No. 3, 2021, pp. 1951–1961. DOI: 10.11591/ijece.v11i3.

38. Ali N., Alam W., Pervaiz M., Iqbal J. Nonlinear adaptive backstepping control of permanent magnet synchronous motor. *Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. et Énerg.* Vol. 66. No. 1, 2021, pp. 9–14.

39. Makhad M., Zazi M. and Loulijat A. Nonlinear control of WECS based on PMSG for optimal power extraction. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. Vol. 10. No. 3, 2020, pp. 2815–2823. DOI: 10.11591/ijece.v10i3.pp2815-2823.

40. Abouelmahjoub Y. and Moutchou M. Nonlinear control strategy of single-phase unified power flow controller. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. Vol. 11. No. 4, 2021, pp. 2864–2875. DOI: 10.11591/ijece.v11i4.pp2864-2875.

41. Mary A. H., Miry A. H. and Miry M. H. System uncertainties estimation based adaptive robust backstepping control for DC DC buck converter. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. Vol. 11. No. 1, 2021, pp. 347–355. DOI: 10.11591/ijece.v11i1.pp347-355.

42. Madark M., Ba-razzouk A. and El Malah M. Linear and nonlinear controllers of a solar photovoltaic water pumping system, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. Vol. 9. No. 5, 2020, pp. 1861–1872. DOI: 10.11591/eei.v9i5.1778.

43. Moutchou M. and Jbari A. Fast photovoltaic IncCond-MPPT and backstepping control, using DC-DC boost converter. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. Vol. 10. No. 1, 2020, pp. 1101–1112. DOI: 10.11591/ijece.v10i1.pp1101-1112.

44. Madark M., Ba-razzouk A., Abdelmounim E. and El Malah M. Adaptive backstepping control of induction motor powered by photovoltaic generator. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. Vol. 11. No. 4, 2021, pp. 2842–2855. DOI: 10.11591/ijece.v11i4.pp2842-2855.

45. Kuchеров D. and Kozub A. Backstepping algorithm for controlling of quadrotor, in *IEEE 6th International Conference Methods and Systems of Navigation and Motion Control*, 2020, pp. 51–55. DOI: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255518.
46. Basri M. A. M. and Noordin A. Optimal backstepping control of quadrotor UAV using gravitational search optimization algorithm, *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. Vol. 9. No. 5, 2020, pp. 1819–1826. DOI: 10.11591/eei.v9i5.2159.
47. Horowitz I. Synthesis of feedback systems, New York. USA: Academic Press, 2013. 740 p.
48. Korn G.A. and Korn T.M. Mathematical handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review, New York, USA: Dover Publications, 2000. 1152 p.
49. Mechali O., et al. Robust finite-time trajectory tracking control of quadrotor aircraft via terminal sliding mode- based active antidisturbance approach: a PIL experiment. *International Journal of Aerospace Engineering*. Vol. 1, 2021, 2021, pp. 1–28. DOI: 10.1155/2021/5522379.
50. Raymond E., Chenoweth C. Aircraft Flight Control Actuation System Design. Warrendale, PA : Society of Automotive Engineers, 1993. 270 p.
51. Синєглазов В. М., Філяшкін М.К. Автоматизовані системи управління повітряних суден: підручник. Київ: НАУ, 2003. 502 с.
52. Kuchеров D. P., Kozub A. M. Metodyi sinteza adaptivnyih sistem terminalnogo upravleniya. Saarbrücken, Deutschland LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 325 p.
53. Aström K.J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning, second ed., Instrument Society of America, 1995. 343 p.
54. Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patents, software, and hardware for PID control: An overview and analysis of the current art, *IEEE Control Systems Magazine*. Vol. 26, Issue 1, 2006, pp. 42–54.
55. Brian R.C. The Design of PID Controllers using Ziegler Nichols Tuning, 2008. Available: URL: http://educyclopedia.karadimov.in-fo/library/Ziegler_Nichols.pdf.

56. Yu Z., Zhang Y., Jiang B., Su C.-Y., Fu J., Jin Y., Chai T. Fractional order PID-based adaptive fault-tolerant cooperative control of networked unmanned aerial vehicles against actuator faults and wind effects with hardware-in-the-loop experimental validation. *Control Engineering Practice*. Vol. 114, 2021, art. No. 104861. DOI: 10.1016/j.conengprac.2021.104861. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85109030768&doi=10.1016%2fj.conengprac.2021.104861&partnerID=40&md5=e2478668f25859dfda648a8638487231>.
57. Zhao C., Guo L. PID controller design for second order nonlinear uncertain systems. *Science China Information Sciences*. Vol. 60. Issue 2, 2017, pp. 1–13.
58. Heinänen E. A Method For Automatic Tuning Of Pid Controller Following Luus-Jaakola Optimization, Master of Science Thesis, Tampere University of Technology, 2018, p. 75.
59. Bolandi H., Rezaei M., Mohsenipour R., Nemati H., Smailzadeh S.M. Attitude Control of a Quadrotor with Optimized PID Controller, *Intelligent Control and Automation*, Issue 4, 2013, pp. 335–342.
60. Parada M., Sbarbaro D., Borges R.A., Peres P.L.D. Robust PI and PID design for first and second order processes with zeros, time-delay and structured uncertainties, *International Journal of Systems Science*. Vol. 48. Issue 1, 2017, pp. 95–106.
61. Sushchenko O.A., Shyrokyi O.V. H_2/H_∞ Optimization of System for Stabilization and Control by Line-of-Sight Orientation of Devices Operated at UAV, in proceedings of the *IEEE 3rd International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments*, Kiev, Ukraine, October 13–15, 2015, pp. 235–238.
62. Scola I.R., Quadros M.M., Leite V.J.S. Robust Hybrid PI Controller with a Simple Adaptation in the Integrator Reset State, in *Proceedings of the International Federation of Automatic Control*, Toulouse, France, July 9–14, 2017, pp. 1493–1498.
63. Li Y., Ang K. H., Chong G., Feng W., Tan K. C., Kashiwagi H. CAutoCSD-Evolutionary Search and Optimisation Enabled Computer Automated Control System Design”, *International Journal of Automatic and Computer*. Vol. 1, Issue 1, 2004, pp. 76–88.

64. de Oliveira F.S.S., Souza F.O., Palhares R.M. PID Tuning for Time-Varying Delay Systems Based on Modified Smith Predictor”, in *proceedings of the International Federation of Automatic Control*, Toulouse, France, July 9–14. 2017, pp. 1291–1296.
65. Zhao C., Guo L. On the Capability of PID Control for Nonlinear Uncertain Systems, in *proceedings of the International Federation of Automatic Control*, Toulouse, France, July 9–14, 2017, pp. 1557–1562.
66. Killingsworth N.J., Krstic M. PID tuning using extremum seeking: online, model-free performance optimization”, *IEEE control systems*. Vol. 26, Issue 1, 2006, pp. 70–79.
67. Salih A.L., Moghavvemi M., Mohamed H.A.F., Gaeid K. S. Flight PID controller design for a UAV quadrotor, *Academic Journals, Scientific Research and Essays*. Vol. 5, Issue 23, 2010, pp. 3660–3667.
68. Kada B., Ghazzawi Y. Robust PID Controller Design for a UAV Flight Control System”, in *proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, October 19–21, 2011, San Francisco, USA. Vol II, pp. 945–950.
69. Argentim L.M., Rezende W.C., Santos P.E., Aguiar R.A. PID, LQR and LQR-PID on a Quadcopter Platform, in *proceedings 2nd International Conference on Informatics, Electronics and Vision*, Dhaka, Bangladesh, May 17–18, 2013, pp. 1–6.
70. Vasilenko O.V., Kucherov D.P., Ivanov B.P. On two approaches to the synthesis control system of the ship: optimal on a time and proportional – differential controller, *Control, Navigation and Communication System*. Vol. 11, Issue 3, 2009, pp. 80–85.
71. Keel L.H., Bhattacharyya S.P. Controller synthesis free of analytical models: Three term controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*. Vol. 53, Issue 6, 2008, pp. 1353–1369.
72. Taranenko, Y.K., Oliinyk, O.Y. & Lopatin, V.V. Using LQR Controller for Optimizing UAV Control Systems. *Cybern Syst Anal*. Vol.62, 2026, pp. 152–164. URL: <https://doi.org/10.1007/s10559-026-00854-7>.

73. Azarskov V.N., Pilchevsky A.Yu., Zhiteckii L.S., Solovchuk K.Yu. Is the l_1 -optimal Lateral Autopilot of PI Type Robust?, in proceedings of the *IEEE 4th International Conference of Navigation and Motion Control*, Kyiv, Ukraine, October 18–20. 2016, pp. 170–174.
74. Oliva-Palomo F., Munoz-Vazquez A.J., Sanchez-Orta A., et al. A Fractional Nonlinear PI-structure Control for Robust Attitude Tracking of Quadrotors, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2018, pp. 1–10.
75. Kuchеров D., Kozub A. and Rasstrygin A. Setting the PID Controller for Controlling Quadrotor Flight: a Gradient Approach, 2018 *IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, Kiev, Ukraine, 2018, pp. 90–93. DOI: 10.1109/MSNMC.2018.8576294.
76. Kuchеров D.P., Kozub A.M. Mathematical model of UAV as agent of multi-agent system, in *proceedings of the Dependable Systems, Services, and Technologies*, Kyiv, Ukraine, May 24–27. 2018, pp. 358–362.
77. Nocedal J., Wright S.J. Numerical Optimization, Second ed., Springer, New York, 2006. 664 p.
78. Pounds P., Mahony R., Hynes P., Roberts J. Design of a Four-Rotor Aerial Robot, in *proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation*, Auckland, November 27–29. 2002, pp. 145–150.
79. Kuchеров D., Kozub A. Backstepping Algorithm for Controlling of Quadrotor. 2020 *IEEE 6th International conference “Methods and systems of navigation and motion control”* (MSNMC), October 20–23, Kiev, Ukraine, p. 51–55. DOI: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255518.
80. Kuchеров D., Kozub A., Tkachenko V., Rosinska G., Poshyvailo O. PID Controller Machine Learning Algorithm Applied to the Mathematical Model of Quadrotor Lateral Motion. 2021 *IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development*, APUAVD 2021. Proceedings, 2021, pp. 86–89. DOI:10.1109/APUAVD53804.2021.9615438.

81. Теоретичні основи технічної кібернетики / Артюшин Л. М., Машков О. А., Дурняк Б. В., Плашенко О. А. Львів.: Українська академія друкарства, 2004. 120 с.

82. Вирішення крайової задачі динаміки польоту методом зустрічних рухів / Коврижкін О.Г. та ін. *Вісті ВНЗ. Авіаційна техніка*. 1993. № 1. С. 30–34.

83. Артюшин Л.М., Машков О.А., Сівов Н.С. Теорія автоматичного керування. Київ: КІВПС, 1996, 686 с.

84. Теорія автоматичного керування. Л. М. Артюшин, О. А. Машков, Б. В. Дурняк, М. С. Сівов. Львів: УАД, 2004. 272 с.

85. Кунцевич В. М. Управління в умовах невизначеності: гарантовані результати в завданнях управління та ідентифікації. Київ: Наук. думка, 2006. 264 с.

86. Робастні методи оцінювання, ідентифікації та адаптивного управління / В. М. Азарсков, Л. Н. Блохін, Л. С. Житецький, Н. Н. Куcssуль. Київ: НАУ, 2004. – 500 с.

87. Jaulin Luc. Applied Interval Analysis: With Examples in Parameter and State Estimation, Robust Control and Robotics. Springer Science & Business Media, 2001. 379 p.

88. Nikolaiev O. L., Polishchuk V. A. and Zadorozhna T. P. Improving the Models of Dynamics of Adaptively Controlled Elements and Drives Based on Functional Materials. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* Vol. 42. No. 6. 2020, pp. 885–899. DOI: 10.15407/mfint.42.06.0885.

89. Kurzhanski A. B., Varaiya P. Dynamics and Control of Trajectory Tubes: Theory and Computation. Springer, 2014. 378 p. DOI:10.1007/978-3-319-10277-1.

90. Shalev-Shwartz Shai and Ben-David Shai. Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms. Cambridge University Press. 2014. 449 p.

91. Goodwin G. C., Sin R .S. Adaptive filtering, prediction and control / Goodwin G.C., Sin R.S. Engewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall, 1984. 572 p.

92. Schweppe F. C. Recursive state estimation: unknown errors and system inputs. *IEEE Trans. Autom. Control*. 1968. Vol. AC-13. № 1. P. 22–26.

93. Can Li, Grossmann Ignacio E. A Review of Stochastic Programming Methods for Optimization of Process Systems Under Uncertainty. *Frontiers in Chemical Engineering*. 2021, pp.1–27. DOI: 10.3389/fceng.2020.622241.

94. Приймак Б. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи [Електронне видання] : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 310 с.

95. Mareels Iven, Polderman Jan Willem. Adaptive Systems: An Introduction. Springer Science & Business Media, 2012. 342 p.

96. Кунцевич В. М., Личак М. М. Синтез оптимальних та адаптивних систем управління. Ігровий підхід. Київ: Наук. думка, 1985. 248 с.

97. Bertsekas Dimitri P. Dynamic Programming and Optimal Control. Volume I. Fourth Edition. Athena Scientific, Belmont, Massachusetts. 2020. 550 p.

98. Божко А. Е. Синтез оптимального керування коливальними системами. Київ: Наук. думка, 1990. 164 с.

99. Shtessel Y., Edwards C., Fridman L., Levant A. Sliding Mode Control and Observation. New York: Springer, 2014. 356 p. DOI: 10.1007/978-0-8176-4893-0.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ РУХОМ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА БАЗІ НЕЙРОКОНТРОЛЕРА

Групове або колективне управління є одним із пріоритетних напрямів розвитку технічних систем. Це пояснюється збільшенням кількості технічних об'єктів, наділених певною часткою штучного інтелекту, що своєю чергою вимагає розв'язання технічних питань, пов'язаних з їх організацією спільних дій, як-от узгодженість, взаємна допомога та безпека.

Першою серед них є організація синхронних рухів з дотриманням відстаней, інтервалів і перевищення під час розгляду цих об'єктів у тривимірному просторі у процесі руху за маршрутом. Для БПЛА різної конфігурації рух за маршрутом є завданням різної складності, наприклад, під час польоту у вільному просторі, де немає перешкод, на низьких і дуже низьких висотах, де перешкоди є поверхневими об'єктами, або, наприклад в обмеженому просторі необхідні підвищені характеристики маневреності.

Комплекс маневрів, що здатний виконувати БПЛА спеціальної конструкції, як-от чотиримоторні літальні апарати, які можуть зависати над об'єктом та різко змінювати напрямок руху. Нині більшість технічних питань, пов'язаних із забезпеченням їх польоту, а саме: енергопостачання, конструкція корпусів, зависання, певною мірою розв'язані. Проте розвиток і програмування контролерів, які здійснюють ефективний контроль і особливо реалізацію управління групою або контроль рою, залишаються актуальними завданнями.

Переваги колективного управління полягають у можливості отримання кращих характеристик часу, точності, ймовірності виконання остаточного завдання, покладеного на групу повітряних платформ. Група об'єктів, що виконують спільне завдання, називають багатоагентною системою, окремим елементом системи є агент, здатний виконувати низку найпростіших дій. Дії системи агентів повинні бути безпечними для інших агентів. У цьому разі група

має діяти в деякій допустимій області, всередині якої дії агента не заважають іншим агентам системи. Для експерименту групових польотів пілотованих повітряних транспортних засобів необхідні мінімальні відстані, еквівалентні 2–3 корпусам транспортних засобів та гарантування безпечного маневрування.

Наявні підходи для розв’язання проблеми управління роями запозичені зі спостережень поведінки біосистем, як-от мурашник, рій бджіл, зграя птахів. Для досягнення такого взаєморозуміння і координації рухів, що мають перелічені біосистеми, необхідно мати нові алгоритми, яким присвячено цей розділ. Запропоновані алгоритми ґрунтуються на сучасних досягненнях науки в області контролю БПЛА, а також пропонують низку рішень для традиційних завдань управління дорожнім рухом за заданим маршрутом, а також розглядають можливі реконфігурації, що становлять інтерес для вивчення рухів у замкнутому просторі.

Вважається, що корисним завданням, що виконується групою квадаторів, є моніторинг поверхні Землі. Для виконання цього завдання робототехнічна платформа оснащена цільовим і допоміжним обладнанням, яке забезпечує збирання та передавання інформації до пункту приймання та аналізу. Тому основні зусилля спрямовані на розроблення й узагальнення законів управління, що забезпечують дію групи агентів БПЛА в стандартних умовах польоту, а також на властивості законів управління, які забезпечують стабільність і контролюють рух цілої групи.

3.1. Постановка завдання на управління групи із застосуванням нейромережі

Альтернативою розглянутим методам маршрутизації (див. підрозділ 1.2) є використання нейромережевих моделей, які дають змогу у разі значного зниження витрат часу отримати хороші квазіоптимальні рішення [1–4]. Так, для виконання завдання комівояжера широко використовуються нейронні мережі Хопфілда і Кохонена [5, 6].

Нейронна мережа Хопфілда. Можливим напрямом розв’язання задачі одновимірної маршрутизації є використання динамічної нейронної мережі Хопфілда з безперервним станом [7–11]. Така мережа складається з нейронів (n – кількість пунктів призначення), розташованих у формі матриці $n \times n$, де i -й рядок матриці відповідає i -му пункту призначення, i -й стовпець – i -му номеру в маршруті. Приклад такої мережі показано на рис. 3.1.

		Порядковий номер у маршруті				
		1	2	3	4	5
П У Н К Т И	1	x	0	0	0	0
	2	0	0	x	0	0
	3	0	x	0	0	0
	4	0	0	0	x	0
	5	0	0	0	0	x

Рис. 3.1. Матриця нейронної мережі Хопфілда

Динаміка такої нейронної мережі описується рівнянням:

$$\frac{dU_{ij}}{dt} = \frac{U_{ij}}{\tau_{ij}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{\mu=1}^n \sum_{\nu=1}^n W_{ij\mu\nu} \cdot V_{\mu\nu} - I_{ij},$$

де $U_{ij}(t)$ – внутрішній стан нейрона; τ_{ij} – стала часу нейронів у мережі; $W_{ij\mu\nu}$ – вагові коефіцієнти нейромережі; $V_{\mu\nu}$ – стан нейронів; I_{ij} – величина зовнішнього зміщення (порога). Відрізок $[0,1]$ відповідає вихідному стану нейронів, які визначаються за функцією активації:

$$V_{ij} = g(U_{ij}) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda U_{ij}}}.$$

У задачі є чотири обмеження, які повинні бути враховані для отримання допустимого і правильного розв'язку:

- кожен пункт має обслуговуватися тільки один раз;
- одночасно може обслуговуватися тільки один пункт;
- остаточний маршрут повинен містити всі пункти;
- сумарна довжина маршруту має бути мінімальною.

Цільова функція, мінімум якої є оптимальним розв'язком, має вигляд:

$$E = \frac{A}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{v=1}^n V_{ij} V_{iv} + \frac{B}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{\mu=1}^n V_{ij} V_{\mu j} + \frac{C}{2} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_{ij} - n \right]^2 + \frac{D}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{\mu=1}^n \sum_{i=1}^n d_{ij} V_{ij} + (V_{\mu, j+1} + V_{\mu, j-1}) = E_1 + E_2 + E_3 + E_4,$$

де A , B , C , D – штрафні коефіцієнти, що регулюють строгість дотримання додаткових умов в кінцевому розв'язку. Коректному розв'язанню відповідає стаціонарний стан мережі, у якому лише n нейронів активні і в кожному стовпці і в кожному рядку матриці міститься один і тільки один активний нейрон. Якщо хоча б одна складова енергетичної функції (E_1 , E_2 , E_3 або E_4) відрізняється від 0, то розв'язок буде допустимим, але не «хорошим». І навпаки, всі обмеження задовольняються, але це може статися і за отримання локального мінімуму, розв'язок буде «хорошим», але не допустимим. Величина коефіцієнтів регулює «торг» між пошуком маршруту мінімальної довжини і раціональністю/здійсненністю самого маршруту.

Аналіз наданих формул дає змогу визначити основні параметри нейронної мережі:

- вагові коефіцієнти:

$$W_{ij\mu v} = -A\delta_{i\mu} - B\delta_{jv} + C\delta_{i\mu} \cdot \delta_{jv} - D \cdot d_{i\mu} (\delta_{\mu, j+1} + \delta_{\mu, j-1}),$$

де символ Кронекера відповідає формулі:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{for } i = j; \\ 0, & \text{for } i \neq j; \end{cases}$$

- зовнішні зміщення:

$$I_{ij} = -\frac{C}{2} + (A + B).$$

Постійні коефіцієнти A , B , C , D запропоновані Д. Хопфілдом відповідно: $A = B = 500$, $C = 200$, $D = 500$.

Як зазначено вище, розглянута нейронна мережа Хопфілда складається з n^2 нейронів, а кількість зв'язків між ними – $O(n^3)$. Ця особливість нейронної мережі призводить до двох небажаних наслідків: по-перше, обчислювальна складність (простір і відповідно час) не дає можливості конструювати мережі, здатні виконувати завдання досить великої розмірності; по-друге, сконструйована у такий спосіб нейронна мережа здатна виконувати завдання тільки для закладеної в ній під час навчання кількості пунктів, тобто в разі зміни кількості пунктів обслуговування необхідно формувати нову мережу. Також до недоліків нейромережі Хопфілда можна віднести ймовірність отримання локального мінімуму або неприпустимого маршруту [38, 39]. Перевагою нейронної мережі є її здатність швидко робити обчислення під час апаратної реалізації.

Нейронна мережа Кохонена. Для виконання завдання одновимірної маршрутизації застосовується також нейронна мережа Кохонена, що самоорганізовується [12, 13], яка навчена виявленню груп (кластерів) векторів входу [14–16]. Одновимірні карти Кохонена мають необхідну властивість відображати структуру даних так, щоб близькі кластери вхідних векторів відповідали близько розташованим нейронам. Архітектура нейромережі Кохонена дуже проста: два вхідних нейрони, на які послідовно подаються координати X і Y пунктів призначення; N нейронів шару Кохонена, що утворюють одновимірний ланцюжок (рис. 3.2).

Навчальна множина для мережі утворює сукупність координат всіх пунктів призначення.

Алгоритм навчання нейронної мережі Кохонена здійснюється такою послідовністю кроків [17]:

Випадковим чином встановлено вагові коефіцієнти нейронів у шарі Кохонена W_x і W_y .

З усієї сукупності пунктів випадковим чином вибирається один, координати якого подаються на вхід нейронної мережі.

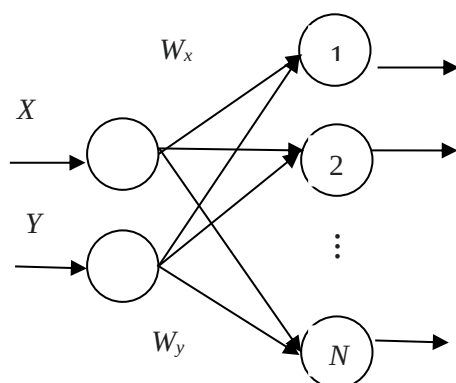


Рис. 3.2. Архітектура нейронної мережі Кохонена

Для кожного нейрона вихідного шару Кохонена визначається евклідова відстань між координатами обраного пункту і відповідними ваговими коефіцієнтами:

$$D_j = (x - w_{xj})^2 + (y - w_{yj})^2, j = 1, \dots, N.$$

Визначається нейрон-переможець, який забезпечує найменшу евклідову відстань:

$$D_k = \min_j \{D_j\},$$

де k – номер нейрона-переможця.

Відповідно до радіуса тяжіння $r(j, k)$ модифікуються вагові коефіцієнти нейронної мережі:

$$w_{xj}(t+1) = w_{xj}(t) + r(t) \cdot a(t) \cdot (x - w_{xj});$$

$$w_{yj}(t+1) = w_{yj}(t) + r(t) \cdot a(t) \cdot (y - w_{yj}), j = 1, \dots, n,$$

де $a(t)$ – параметр швидкості навчання, який зменшується з плином часу за таким законом:

$$a(t) = \frac{1}{t}.$$

Умова переходу на другий крок і повторення зазначеної процедури для всіх пунктів. Зменшуємо значення $r(t)$, $a(t)$. Така процедура триває доти, доки не перестануть змінюватися вагові коефіцієнти нейронної мережі.

Після завершення процесу навчання становище пунктів у маршруті визначається положенням відповідного йому нейрона у вихідному шарі. Іноді трапляється, що дві або більше кількості пунктів відображаються на один і той самий вихідний нейрон. Подібна ситуація може інтерпретуватися так, що локальне впорядковування цих пунктів не має значення, і потребує лише локальної оптимізації частини маршруту. При декількох десятках пунктів така оптимізація може скорегувати його довжину на величину до 25 %. Для сотень пунктів вона, як правило, не покращує результат, а потребує лише додаткових витрат часу і тому не використовується.

До переваг такої мережі можна віднести можливість її використання в реальному часі без втрати точності і збільшення тривалості розрахунку. Дійсно, у разі появи нового пункту призначення достатньо подати його координати на вхід нейронної мережі, визначити належність до одного з кластерів і продовжити політ відповідно до вже знайденого маршруту. Якщо відстань між кластерами і новим пунктом призначення велика, має сенс провести перерахунок, але форматувати

вагові коефіцієнти нейронної мережі не випадковими значеннями, а отриманими раніше. Це збільшить швидкість прийняття рішення в декілька разів.

Як зазначалося вище, у розглянутій нейронній мережі Кохонена можлива ситуація, коли одному або декільком вихідним нейронам поставлені у відповідність кілька пунктів призначення. Ця властивість нейронної мережі до групування була запропонована для вигідного використання як попередній етап під час визначення маршруту [13]. Алгоритм багаторазового використання нейронної мережі Кохонена можна подати у вигляді такої послідовності кроків:

1. Усі пункти призначення за допомогою нейронної мережі Кохонена розбиваються на групи близько розташованих пунктів. У такій навченій нейронній мережі вагові коефіцієнти кожного нейрона являють собою вектор координат фіктивного пункту, розташованого в центрі відповідної цьому нейрону групи.

2. Положення групи в груповому маршруті визначається положенням відповідного їй нейрона у вихідному шарі нейронної мережі.

3. Для визначення маршруту всередині групи використовується також нейронна мережа Кохонена. Як початковий вибирається пункт, найближчий до центру попередньої групи в груповому маршруті, як кінцевий – пункт, найближчий до центру наступної групи в груповому маршруті.

На третьому етапі розглянутого алгоритму можуть бути використані повний перебір або нейронна мережа Хопфілда.

3.2. Структура системи управління з нейроконтролером

Принцип квазіоптимізації управління введенням нелінійного елемента і зміною структури системи управління ґрунтується на відмінності форм оптимальних процесів у лінійних системах, що змушує використовувати нелінійні елементи, які сприяють формуванню квазіоптимальних управлінь. Окрім того, слід мати інформацію, що характеризує відмінність за величиною і знаком процесу стану від оптимального. Ця інформація необхідна пристрою адаптації, який забезпечує наближення управління до оптимального і реалізовується за допомогою

додаткових обчислювальних пристроїв або датчиків. Зміна структури системи управління спільно з об'єктом під час формування оптимальних процесів зумовлена протиріччям між інформацією про систему і вимогами до якості функціонування. Тому в подальшому викладенні синтез термінального управління, за суттю, є розробленням алгоритмів квазіоптимального управління незалежно від того, точними або наближеними методами знайдені функції термінального управління.

Найзагальніших ефективних результатів у досягненні поставленої мети слід очікувати під час застосування результатів, отриманих у теорії систем штучного інтелекту [8, 18–36], тобто завдяки підвищенню інтелектуальності системи управління. Можливими підходами до виконання цих завдань стануть алгоритми адаптації розпізнавання образів (ситуацій управління). Прикладом цього може бути застосування штучних нейронних мереж у задачах управління динамічними об'єктами, що реалізуються на основі нейрокомп'ютерів. В основі нейрокомп'ютера використана логіка системи розпізнавання "Adaline" (Adaptive linear neuron) [25, 28–31, 36]. У США, Фінляндії та інших країнах ведуться роботи з використання нейрокомп'ютерів для керування хімічними і ядерними реакторами [28]. Актуальними для виконання завдань за допомогою нейрокомп'ютера є маневр винищувача, планування маршруту робота [37–41]. Структура такої системи показано на рис. 3.3.

У нейрокомп'ютері НК «навчальні» вектори x_n піддаються ваговому обробленню, унаслідок якого формується керувальний вплив u , який надходить на об'єкт управління ОР. Початкові значення ваг w_n задаються довільним чином, надалі їх підстроювання проводиться механізмом адаптації МА. Реакція динамічного об'єкта y , сформована під впливом u , порівнюється з правильним відгуком d . Якщо вектор y не збігається з d , то обчислюється помилка $e = d - y$, яка використовується для підстроювання ваг НК відповідно до деякого алгоритму, наприклад, Румельхарта [31, 34, 37]:

$$w_i(k) = w_i(k - 1) + \mu e x_i, \quad (3.1)$$

де k – номер ітерації, i – номер входу нейроконтролера, μ - коефіцієнт швидкості навчання (зазвичай $\mu < 1$). Після цього процедура повторюється доти, поки вихідний вектор не стане досить близьким до еталонного d .

Проте слід мати на увазі деякі недоліки, властиві нейронним мережам. Так, у процесі навчання нейронна мережа не гарантує унеможливлення помилки на довільному кроці. Окрім того, великі значення вагових коефіцієнтів можуть змістити робочу точку регульованої характеристики в область насичення, у разі малих змін ваг мережа перестає вчитися.

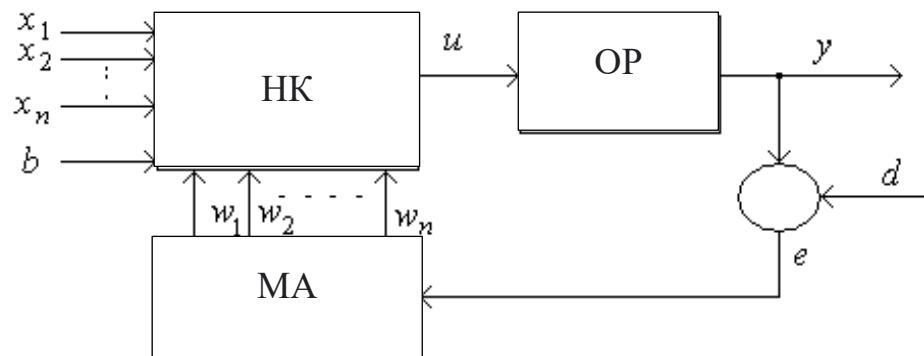


Рис.3.3. Управління за допомогою нейрокомп'ютера

Під час застосування алгоритмів градієнтного спуску як налаштування слід використовувати тільки з унімодальні функції навчання, в іншому разі можливе попадання в область локального, а не глобального мінімуму функції помилки навчання. Щоб алгоритм сходився, збільшення вагових коефіцієнтів, а, отже, і швидкість навчання повинні бути малі, але тоді мережа навчається довго за часом.

Надмірно висока швидкість навчання призводить до нестійкості процесу. У процесі навчання не можна гарантувати, що розроблена мережа стане оптимальною мережею. Як недоліком цього підходу можливо визначити, що під час опису математичної моделі нейромережею складної структури ітераційний процес підстроювання параметрів мережі методом градієнтного спуску вимагає значних

обчислювальних ресурсів; поява нових даних потребує повторного навчання, а значить зберігання всієї вимірювальної інформації [23, 27, 30].

3.3. Алгоритм налаштування вагових коефіцієнтів нейроконтролера під час управління динамічними об'єктами

3.3.1. Постановка проблеми

Останнім часом у машинобудуванні широко використовується підхід побудови систем управління динамічними об'єктами з нейромережевим регулятором у контурі управління. Основною перевагою таких систем є забезпечення заданої якості управління в умовах, коли відбуваються зміни умов функціонування системи або зміна параметрів об'єкта, викликані зміною навантаження на виконавчі механізми системи. Такі умови функціонування виникають у пристроях управління літальних апаратів, робототехнічних пристроїв, ядерних реакторів та ін.

Система управління з нейромережевим регулятором є деякою інформаційно-керувальною системою, що містить обчислювальні пристрої, регулятори, виконавчі пристрої та інші елементи, які можуть використовуватися для автоматичного управління деяким динамічним об'єктом, математична модель якого може бути подана системою диференціальних рівнянь.

Найпоширеніші вимоги, які висуваються до системи управління, – це точність і час відпрацювання завдань об'єктом управління. Значення цих показників суттєво залежать від корисного навантаження, виконавчого елемента та методів управління, що застосовуються, а також умов функціонування.

Розрізняють методи управління з повною інформацією про параметри виконавчого елемента та навантаження та адаптивні підходи, які дають можливість системі функціонувати в умовах зміни її параметрів у широкому діапазоні або ж загалом допускають відсутність апріорної інформації про ці параметри, що є

найпоширенішим випадком. Різка зміна параметрів та збурень розлаштовує систему управління, яка задовільно працює в середніх розрахункових умовах, водночас мета управління може не досягатися. Саме у таких випадках доцільне використання адаптивних підходів.

До таких підходів належить і підхід, заснований на побудові нейромережевого регулятора, що забезпечує корекцію параметрів регулятора з метою оптимізації його роботи в умовах функціонування, що склалися. Перевагами регулятора цього типу можуть бути відсутність еталонної моделі, можливість функціонування з впливами різної природи, наприклад збурень, простота технічної реалізації. У зв'язку з цим завдання синтезу нейромережевого управління динамічним об'єктом в умовах варіювання параметрів виконавчого елемента, навантаження та впливу збурювальних чинників, є актуальним.

Відомі підходи реалізації адаптивних систем ґрунтуються на методах побудови систем самоналаштування, як-от методи побудови екстремальних і нейромережевих систем. Доцільність використання того чи іншого способу побудови системи визначається особливостями об'єкта управління та умовами його функціонування. Так, у разі екстремальної залежності параметрів об'єкта від сигналу керування та за умови безперервної зміни параметрів обладнання існує можливість використання екстремальних способів керування. У тих самих системах, де екстремальність характеристик не виявляється, доцільно використовувати методи, що базуються на регулюванні за нейромережевими принципами.

Більшість розробок, пов'язаних із побудовою нейроконтролерів у контурі управління [28, 31, 42, 43], спираються на результати роботи [29], у якій наведені результати роботи системи “Adaline” під час керування динамічними об'єктами. Система Adaline (Adaptive linear neurone) складається з підсилювачів зі змінними коефіцієнтами передавання (ваговими коефіцієнтами, параметрами налаштування), які налаштовуються в процесі функціонування, і суматора сигналів. Ідея корекції вектора параметрів ґрунтується на результатах чергового випробування та застосування їх до еталонної функції вирішального блока системи “Adaline”. За

результатами порівняння отриманої реакції та очікуваної приймається рішення про корекцію вектора параметрів. Основним недоліком такого способу налаштування є тривалість налаштування та точність відпрацювання завдання динамічним об'єктом після налаштування. Спосіб налаштування суттєво спирається на відмінності, які є у вирішальній функції еталонної моделі та системи “Adaline”. Наявність цих відмінностей визначає величину та напрямок зміни вагових коефіцієнтів, а з іншого боку, для забезпечення точності налаштування необхідно здійснювати корекцію малим кроком, що загалом визначає тривалість процесу їх налаштування. Водночас підстроювання здійснюється до параметрів навчальної моделі, яка не враховує динамічних властивостей об'єкта управління в умовах функціонування. Отже, якщо параметри еталонної моделі відрізняються від параметрів керованого об'єкта, то бажаної точності та швидкодії досягнуто не буде.

У праці [28] система “Adaline” застосована для управління ядерним реактором. Пристрій управління складається з нейроконтролера та ПД-регулятора як еталонної моделі. Для налаштування нейроконтролера (виконаного за принципами побудови системи “Adaline”) як еталонну модель застосовано ПД-регулятор. Для налаштування вагових коефіцієнтів системи нейроконтролера використовуються вихідні дані ПД-регулятора, які відповідно до алгоритму роботи нейроконтролера змінюють його вагові коефіцієнти. Коли реакція нейроконтролера стає такою самою, як і вихід ПД-регулятора, ПД-регулятор вимикається.

Недоліками підходу слід вважати низьку швидкість налаштування вагових коефіцієнтів і недостатні як точність, так і швидкодію запропонованої системи управління, у якій ПД-регулятор використовується як еталонна модель для налаштування нейроконтролера. Точність та швидкодія системи значною мірою визначаються якістю налаштування ПД-регулятора та впливають на швидкість налаштування нейрорегулятора, що потребує часу для навчання.

У праці [31] розглянуто стратегію управління прямої адаптації нейронної мережі для нелінійної системи з невідомими параметрами типу регресії. Передбачається, що система навчається шляхом мінімізації вихідних значень

нейронної моделі. Для систем зі змінною структурою [42] передбачається використання ковзного режиму з метою підвищення стійкої роботи системи управління.

Як показано в [43], за нейрорегуляторного управління динамічним об'єктом існує можливість позбавитися необхідності використання ковзного режиму, який призводить не просто до затягування процесу управління, але і забезпечує щадний режим виконавчої частини системи управління завдяки зведенню до мінімуму числа перемикань сигналу управління.

Метою дослідження є синтез алгоритму налаштування вагових коефіцієнтів нейроконтролера в контурі управління динамічного об'єкта, що має достатні показники точності та швидкодії за відсутності еталонної моделі.

3.3.2. Формулювання завдання управління

Розглянемо динамічний об'єкт, що описується диференціальним рівнянням вигляду

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t), \quad (3.2)$$

у якому $x(t) \in R^n$ вектор змінних стану; $u(t)$ – керувальний сигнал; A – $n \times n$ матриця та b – n -вимірний вектор, тобто

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ k \end{pmatrix}. \quad (3.3)$$

У (3.3) коефіцієнти $a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nn}, k$ визначаються параметрами системи, конструктору системи заздалегідь невідомі. Передбачається тільки, що система (3.1), (3.2) комплексного коріння не має, а коефіцієнти $a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nn}, k$ можуть перебувати в інтервалах

$$\underline{a}_{ni} \leq a_{ni} \leq \bar{a}_{ni}, \quad \underline{k} \leq k \leq \bar{k}, \quad (3.4)$$

межі $\underline{a}_{ni}$, $\bar{a}_{ni}$, $\underline{k}$, $\bar{k}$ вважаються відомими.

Відомо також, що у момент зв'язаний з пуском системи, тобто коли $t = 0$, перебуває у стані $x(0)$. Вважається, що вимірювання станів системи здійснюється малошумовими датчиками або вони можуть бути з достатньою точністю оцінені. Ставиться завдання про переміщення об'єкта з початкового стану $x(0)$ у кінцевий $x(t_k)$ за мінімальний час $T \in [0, t_k]$.

3.3.3. Моделювання алгоритму управління

Відповідно до вимог завдання, припускаючи, що параметри відомі, вважатимемо, що алгоритм управління повинен забезпечити оптимальний режим роботи системи за часом завдяки використанню сигналу управління вигляду $u(t) = \{+U, -U\}$, а також його перемикання в деякі моменти часу з числом інтервалів управління, що визначаються відомою теоремою про n -інтервали. Припустимо, що й за умов завдання з невизначеними параметрами розглянута система має близький режим роботи, причому число перемикань сигналу управління має значно перевищувати n .

Режим роботи системи, що має кількість перемикань сигналу управління близьку до оптимальної і забезпечує необхідну якість управління, називатимемо квазіоптимальним. У цьому разі управління «ковзний режим» динамічної системи не передбачається.

Як і в [219, 222], нейроконтролер за даними c_0 і $\Delta(t)$, $\dot{x}(t)$ обчислює значення деякої вирішальної функції $F(c, X(t))$, де $X(t)$ – вектор, компоненти якого визначаються цифровим кодом сигналів $\Delta(t) = x_3(t) - x(t)$ і $\dot{x}(t)$. Знак функції $F(c, X(t))$ визначає знак сигналу управління $u(t)$, який формується комутувальним елементом, а саме

$$u(t) = \begin{cases} +U, & \text{якщо } F(c, X(t)) > 0, \\ -U, & \text{якщо } F(c, X(t)) < 0 \\ u(t-0), & \text{якщо } F(c, X(t)) = 0. \end{cases} \quad (3.5)$$

Комутувальний елемент перемикає напругу величини $+U$ або $-U$ на вході динамічного об'єкта згідно із законом (3.5). У виразі (3.5) значення управляючого впливу $u(t)$ також зберігається рівним попередньому значенню, якщо фазова точка системи розміщена на поверхні перемикачів, тобто коли $F(c, X(t)) = 0$. Функція $F(c, X(t)) = 0$ у фазовому просторі геометрично інтерпретується поверхнею перемикачів (рис. 3.4), яка ділить весь фазовий простір в області управління протилежних знаків. На рис. 3.4 введені такі позначення: e_1, e_2, e_3 – фазовий простір; U_+ – керувальний вплив позитивного знака; U_- – керувальний вплив негативного знака; O – початок координат.

Сигнал $u(t)$ змушує об'єкт рухатися у бік зменшення помилки $\Delta(t)$, що відповідає положенню точки O (рис.3.4).

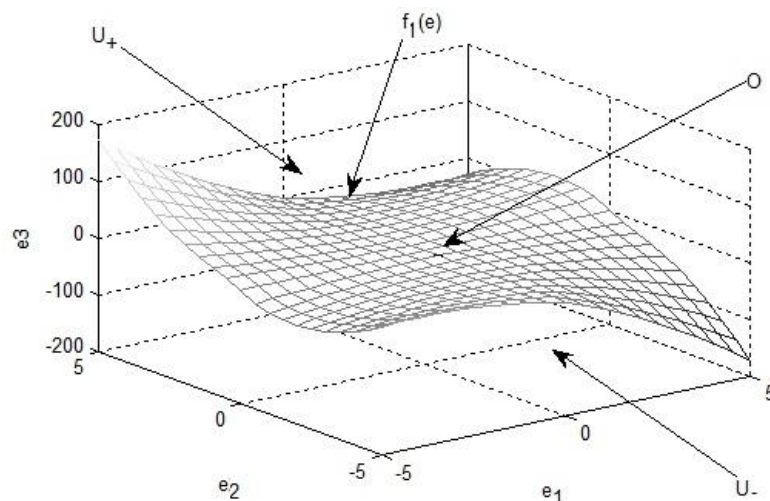


Рис.3.4. Вигляд функції $F(\cdot)$ у просторі координат e_1, e_2, e_3

Основною складністю підходу є визначення вигляду функції $F(\cdot)$. Якщо відомий точний вид математичної моделі (3.1), (3.2) та $n \leq 3$, то функція $F(\cdot)$ виходить в аналітичному вигляді. В інших випадках для функції $F(\cdot)$ слід або спрощувати математичну модель процесу управління, або будувати її у вигляді лінійної моделі щодо вимірюваних координат $X(t)$.

Під час організації обчислювального процесу слід унеможливити вплив кінцевої точності обчислень, що проявляється в нескінченному циклі управління в околиці початку координат. Усунення таких циклів призводить до необхідності введення в околиці початку координат деякої області Ω_u , де дія закону управління (3.5) припиняється, яку назовемо областю досяжності.

Невизначеність параметрів об'єкта (3.1), (3.2) спричинює довільне установлення вагових коефіцієнтів с функції $F(\cdot)$, що може призводити до таких ситуацій у роботі системи:

- 1) «ковзний» режим;
- 2) режим автоколивань;
- 3) попадання об'єкта в коло припустимих помилок $|\Delta(t)| \leq \Delta^*$ за необхідне число перемикачів N^* управляючого впливу $u(t)$.

Перші дві ситуації хибні, остання бажана.

Відмінність помилкових ситуацій здійснюється на підставі логіки, що спирається на підрахунку кількості перемикачів елемента комутації та вимірювання сигналу помилки $\Delta(t)$. Якщо в результаті підрахунку числа перемикачів фіксується зміна управляючого впливу з високою частотою $N \gg N^*$, а сигнал помилки $\Delta(t)$ зменшується за величиною, але знак її щодо Δ^* не змінюється, то розпізнається ситуація 1, тобто система управління функціонує в «ковзному» режимі.

Якщо разом із зміною знака управляючого впливу здійснюється зміна знаку сигналу помилки $\Delta(t)$ щодо Δ^* , то розпізнається ситуація 2 – режим автоколивань. Корекцію вагових коефіцієнтів слід проводити за правилом навчання одношарового персептрона

$$c_i = c_{i-1} - X_1(t) \text{sign} \Delta_{i-1}, \quad (3.6)$$

де $X_1(t)$ – значення фазової точки; c_{i-1} – ваговий коефіцієнт на $(i-1)$ -му кроці налаштування системи; Δ_i – значення помилки корекції, а функція $\text{sign}(\cdot)$ має вигляд

$$\text{sign}(l) = \begin{cases} +1, & \text{якщо } l > 0, \\ -1, & \text{якщо } l < 0, \\ 0, & \text{якщо } l = 0. \end{cases} \quad (3.7)$$

Вибір $X_1(t)$ та Δ_i суттєво впливає на збіжність процесу навчання. З метою підвищення швидкості збіжності до правильного рішення пропонується фіксувати значення координат $\Delta(t)$ та $\dot{x}(t)$ першого перемикавання. Тоді розрахунок вагових коефіцієнтів c_i відбуватиметься не за вихідними значеннями, а за значеннями зафіксованих координат.

Правило (3.7) діє щоразу, коли не задовольняються умови оптимального режиму об'єкта, тобто не виконуються умови $N \leq N^*$ і $\Delta \leq \Delta^*$. Робота системи може бути завершена, якщо задовольняються умови $N \leq N^*$ і $\Delta \leq \Delta^*$.

У разі, коли розпізнано одну з помилкових ситуацій, не слід чекати, коли система зупиниться до кінцевих значень фазового вектора, які розміщені в області допустимих помилок $\Delta^* \in \Omega_{\text{ц}}$ тому, що інформація для проведення корекції обчислювачем вже є, тобто числа N і X_1 відомі. Отже, під час розпізнавання хибної ситуації система може бути зупинена та приведена в початковий стан для подальшого випробування.

Отже, алгоритм роботи системи полягає в тому, що на кожному випробуванні розраховується кількість змін знака сигналу управління та фіксується помилка системи. Ця інформація використовується в (3.7), якщо результати випробування відрізняються від очікуваних.

3.3.4. Реалізація системи управління

Описаний підхід управління динамічним об'єктом можна реалізувати за допомогою приладу, який містить (див. рис. 3.5), як варіант конструктивного виконання, виконавчу частину (ВЧ), у складі нейроконтролера (НК), релейного елемента (РЕ), динамічного об'єкта (ДО); вимірювального каналу (ВК), який складається з датчика положення (ДП), датчика швидкості (ДШ), обчислювача

помилки (ОП); системи налаштування нейроконтролера (СН), що складається з блоків кодування (БК), блока пам'яті (БП), обчислювача (О); логічного пристрою (ЛП), у складі лічильника кількості перемикачів (ЛКП), фіксатора першого перемикачів (Ф), компаратора числа перемикачів (КЧП), компаратора помилки (КП), а також можуть бути введені блоки зупинки та початкових установок (БЗПУ).

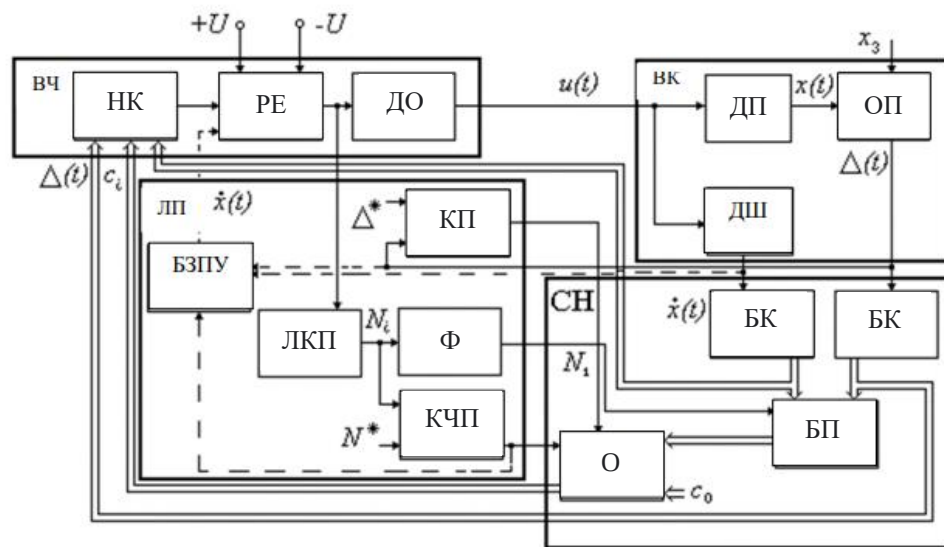


Рис. 3.5. Структура системи керування з нейроконтролером

Операція переведення об'єкта в початковий стан $X(0)$ здійснюється блоком зупинки і початкових установок, у які інформація надходить від обчислювача помилки, датчика швидкості і компаратора числа перемикачів. Вихідний сигнал блока діє на релейний елемент, який встановлює динамічний об'єкт у початковий стан, за таких умов фазовий вектор дорівнює початковому значенню $X(t)=X(0)$. Пристрій, за допомогою якого реалізовується цей підхід налаштування вагових коефіцієнтів системи “Adaline” під час керування динамічним об'єктом, працює у такий спосіб.

Перед початком роботи в системі управління (див. рис. 3.5) об'єктом, що перебуває в початковому стані $x(0)$, встановлюють допустиме значення помилки Δ^* та точне значення мінімальної кількості перемикачів N^* . Установлюють довільні значення вагових коефіцієнтів нейрорегулятора c_0 . На вхід системи подають завдання x_3 для відпрацювання. Момент часу t подавання завдання в систему

управління вважають як початковий, тобто $t = 0$. З цього моменту здійснюють розрахунок помилки за положенням та швидкістю навантаження за допомогою датчиків положення, швидкості та обчислювача помилки. Їх значення надходять на блоки кодування, які перетворюють поточні значення помилок положення та швидкості навантаження об'єкта на цифровий код. Цей код надходить на сигнальні входи $\Delta(t)$ і $\dot{x}(t)$ та нейроконтролера. На входи вагових коефіцієнтів c_i нейроконтролера надходять значення c_0 від обчислювача.

3.3.5. Дослідження основних властивостей алгоритму

Для моделювання системи налаштування та дослідження основних властивостей алгоритму вивчаємо динаміку об'єкта (3.1), у якому матриця A та вектор b мають вигляд

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ k \end{pmatrix}. \quad (3.8)$$

У цьому разі елементи матриці a_{21} , a_{22} , k відповідно до умов експерименту вважаються невідомими. Функція $F(\cdot)$ для об'єкта (3.1), (3.8) має вигляд

$$F(c, X(t)) = c_1 \Delta(t) + c_2 \dot{x}(t).$$

Результати моделювання запропонованого алгоритму налаштування наведені на рис. 3.6–3.9. Так, на рис. 3.6 показано початковий розлад вагових коефіцієнтів нейроконтролера c_1 , c_2 у бік збільшення, який призводить до «ковзного» режиму динамічного об'єкта; розлад c_1 , c_2 у бік зменшення коефіцієнтів призводить до режиму автоколивань (рис. 3.10).

Після завершення процесу налаштування отримано квазіоптимальний за швидкістю процес управління (див. рис. 3.10). Порівняння «ковзного» режиму (див. рис. 3.6) з оптимальним (див. рис. 3.11) дає змогу оцінити програш у тривалості «ковзного» режиму, в даному випадку він становить 29 %. Водночас

квазіоптимальний режим роботи, отриманий після налаштування, поступається оптимальному режиму лише 3 %. На процес навчання нейроконтролера для динамічного об'єкта, який досліджено, витрачено п'ять ітерацій за початкового розладу вагових коефіцієнтів у 100 %, що показано на рис. 3.12.

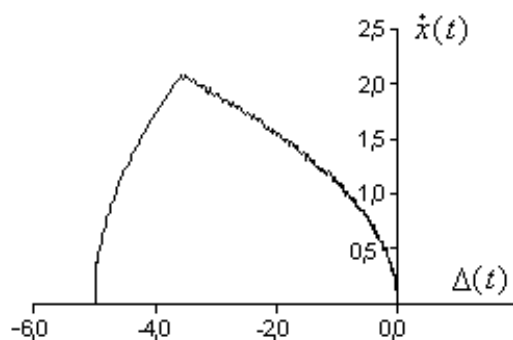


Рис. 3.6. Змінний режим динамічного об'єкта у фазовій площині

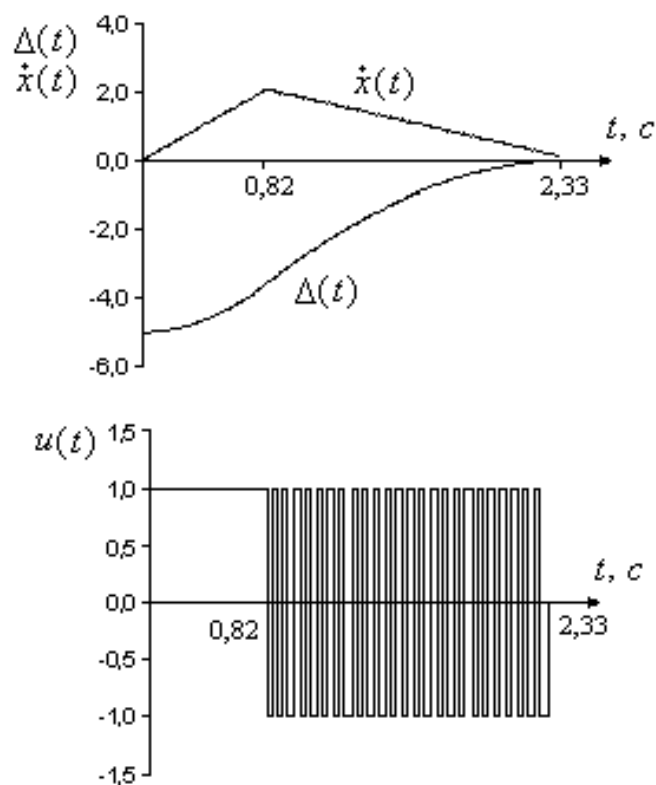


Рис. 3.7. Сигнали $\Delta(t)$, $\dot{x}(t)$ і $u(t)$ динамічного об'єкта у часовій площині під час ковзного режиму

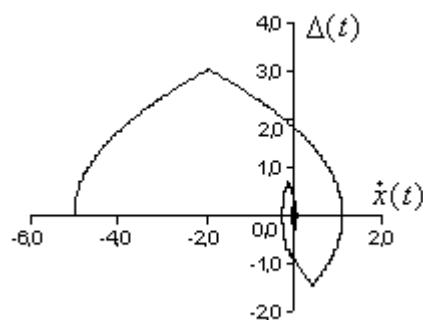


Рис. 3.8. Автоколивальний режим динамічного об'єкта у фазовій площині

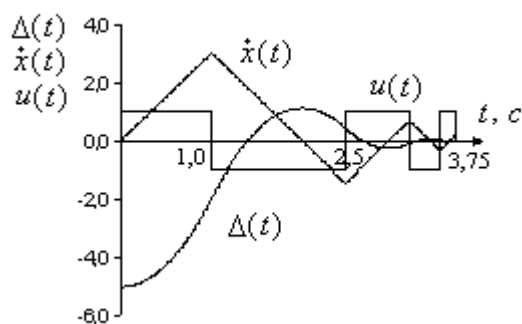


Рис. 3.9. Сигнали $\Delta(t)$, $\dot{x}(t)$ і $u(t)$ динамічного об'єкта у часовій площині під час автоколивального режиму

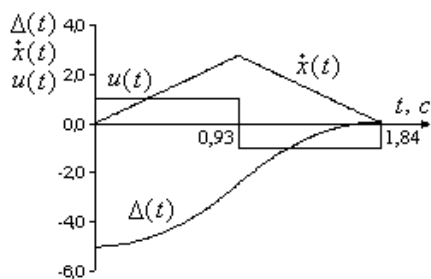


Рис. 3.10. Сигнали $\Delta(t)$, $\dot{x}(t)$ і $u(t)$ динамічного об'єкта в квазіоптимальному режимі

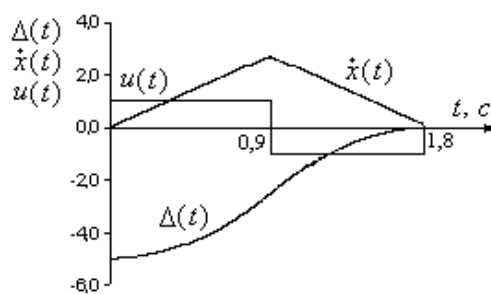


Рис. 3.11. Сигнали $\Delta(t)$, $\dot{x}(t)$ і $u(t)$ динамічного об'єкта в оптимальному режимі

Підвищення ефективності налаштування вагових коефіцієнтів системи “Adaline” при керуванні динамічним об’єктом в алгоритмі, який запропоновано, та порівняно з відомими, полягає в тому, що досягається точність відпрацювання завдань з мінімальними часовими витратами та зменшується тривалість налаштування нейроконтролера завдяки додатковому контролю кількості перемикань та використання як навчальну точку – фазових координат точки першого перемикання сигналу управління.

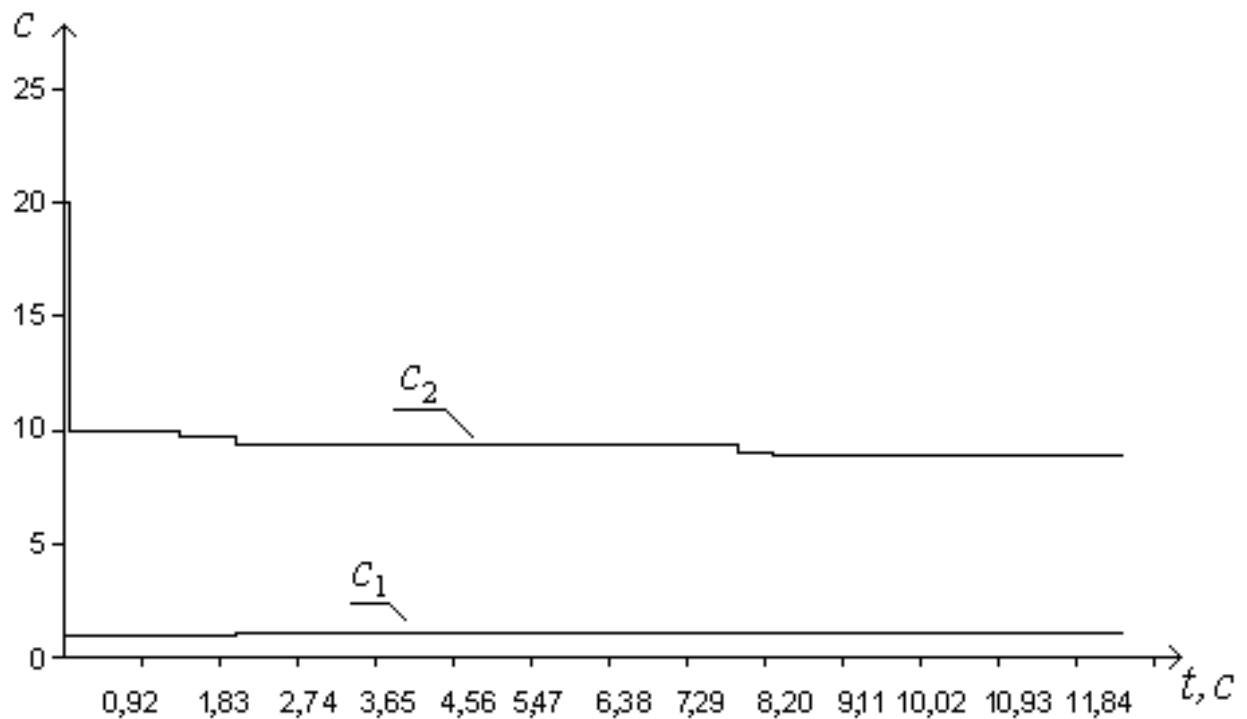


Рис. 3.12. Корекція коефіцієнтів c_i нейрорегулятора у процесі навчання

Водночас інформація навчання нейроконтролера береться за поточною лінією перемикання $F(c, X(t))$, яка вибудовується на кожному кроці навчання. Такий алгоритм налаштування, крім кращих характеристик відпрацювання об’єктом завдання, має додаткову можливість навчатися в процесі функціонування системи в разі зміни параметрів об’єкта, які виявляються, наприклад, під час зміни навантаження або його початкового стану. У разі постійно діючого завдання можна значно зменшити час навчання нейроконтролера завдяки визначенню помилкових ситуацій та дострокової корекції вагових коефіцієнтів нейроконтролера [44, 45].

3.4. Порядки дій під час групової побудови та планування маршруту безпілотних літальних апаратів

3.4.1. Постановка проблеми

Одним із поширених і таких, що інтенсивно розвиваються останнім часом повітряних транспортних засобів є безпілотний літальний апарат (БПЛА). Це досить великий клас транспортних засобів, у якому завдання доставлення вантажів, логістики виконуються класичним для засобів цього типу способом. Відмінною його ознакою є відсутність людини на борту літального апарата, що викликає певні труднощі, пов'язані з реалізацією автономного або ж дистанційного керування апаратом, а також прийняттям рішень про подальші дії під час виконання поставлених завдань.

Першочерговим завданням забезпечення польоту безпілотного літального апарата, є розроблення маршруту. Звичайними вимогами до маршруту виступають: безпека руху, мінімальна довжина маршруту, можливість відпрацювання просторової траєкторії маршруту БПЛА. Це завдання значно ускладнюється за наявності перешкод на маршруті польоту. Нині це завдання вирішується шляхом складання маршруту набором шляхових координат у всесвітній геодезичній системі WGS84. За таких умов цьому формуванню польотного завдання може вимагати знання не тільки географічних координат місцевості, але і координат перешкод, і висуває певні вимоги до точності отриманої інформації. Множинність рішень у цьому підході змушує вибрати оптимальний маршрут.

Вибір маршруту польоту пов'язаний з необхідністю врахування особливостей транспортного засобу, а саме: виконання маршруту в реальному масштабі часу, наявність апаратних обмежень (запам'ятовувальний пристрій, обчислювальні ресурси, засоби інформаційного забезпечення), точність введеної інформації, необхідність визначення зважених областей, оцінювання довжини шляху і його вартості, особливості структур використовуваних даних, необхідність у запам'ятовуванні маршруту та ін.

3.5. Застосування інтерполяційних багаточленів для створення маршрутів БПЛА

До виконання цього завдання можливе залучення методів планування маршруту, заснованих на побудові графів [46]. Однак, відомі методи пошуку маршруту, як-от алгоритм Дейкстри, Астар, жадібні алгоритми, двонапрямлені, мурашиної колонії мають цілу низку особливостей, не властивих літальним апаратам. Серед них виконання пошукових рухів, необхідність зміни стратегії пошуку в разі зациклення, що вимагає додаткового часу на пошук маршруту і є неприпустимим в польоті. Введення виваженості областей, передбачуване в цих підходах, загалом не розв'язує проблему обходу перешкод.

Існує низка підходів до вибору кривої маршруту. Один з них передбачає побудову маршруту, що подає з'єднання пари арочних кривих і лінійної ділянки (криві Дубінса) [47, 48]. Серед можливих варіантів побудови вибирається та, яка має найменшу довжину. Відомий інтерес для виконання цього завдання пропонує підхід, що використовує інтерполяційні поліноми Лагранжа [47, 49]. Цей підхід дає змогу будувати траєкторію зважаючи на ризики передбачуваних загроз. Однак виконання передбачає знання розподілів ризиків і його похідних, що не завжди доступне. Слід виокремити метод планування маршруту, заснований на побудові діаграм Вороного. Ділянки шляху БПЛА між сусідніми точками, координати яких залежать від взаємного розташування джерел загроз, визначають траєкторію БПЛА на місцевості, що збігається з розв'язанням системи диференціальних рівнянь для рухомого в просторі тіла. Планування маршруту в цьому разі в реальному масштабі часу є проблематичним.

Проведено порівняльний аналіз основних способів побудови траєкторій маршруту БПЛА, який наведено в табл. 3.1.

За результатами аналізу вибрано для дослідження побудови траєкторії маршруту БПЛА метод кривих Без'є, який використовує мінімальну кількість маршрутних точок.

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз основних способів побудови траєкторії БПЛА

Метод	Кількість опорних точок	Гладкість траєкторії	Обчислювальна складність	Врахування динаміки БПЛА	Уникнення перешкод	Загальна оцінка для БПЛА
Криві Без'є	Мала (низька)	Дуже добра ($C^1 - C^2$)	Середня	Середнє	Середнє	8,0/10
Поліноми (поліноміальні сплайни)	Середня	Відмінна (можна C^2 і вище)	Висока	Добре	Добре	7,5/10
Експоненціальні функції	Мала	Добра	Низька	Слабке	Слабке	4,5/10
Полілінійний (ламаний)	Велика	Погана (різкі кути)	Дуже низька	Слабке	Добре	6,0/10
В-сплайни	Середня	Відмінна	Середня-висока	Добре	Добре	8,5/10

Необхідно розробити маршрут БПЛА на етапі підготовки польотного завдання, що містить початкове і кінцеві значення пункту призначення, а також координати перешкод на шляху маршруту. В умовах цього завдання траєкторія являє собою деяку криву, що з'єднує дві фіксовані точки: початок маршруту, пункт призначення і деякі проміжні точки, набір яких повинен бути мінімальним.

Інтерполяційний багаточлен, побудований на підставі заданих n -точок з координатами (x_i, y_i) , де $i = \overline{1, n}$, має вигляд [50]

$$s(n) = \sum_{i=1}^n \prod_{i \neq j} \frac{(x - x_i)}{(x_i - x_j)}. \quad (3.9)$$

Крива, побудована на основі (3.9), має коливальний характер. Це явище зумовлено тим, що побудована крива проходить через контрольовані точки, а в неконтрольованих крива може мати коливальність. Пояснюється це особливістю подання інтерполяційного багаточлена як суми ступеневих функцій. Для підвищення точності відтворення кривої слід додавати проміжні точки (наприклад, такі як дотичні до кривої), що підвищує громіздкість інтерполяційного багаточлена.

3.5.1. Багаточлени Без'є

У цьому разі інтерполяційний багаточлен задається в параметричній формі [51]

$$x = s_x(t); \quad y = s_y(t), \quad (3.10)$$

де $t \in [0, 1]$. Тоді, для заданих n -точок багаточлен Без'є записується у вигляді

$$s_x(t) = \sum_{k=0}^n C_n^k t^k (1-t)^{n-k} x_i, \quad s_y(t) = \sum_{k=0}^n C_n^k t^k (1-t)^{n-k} y_i, \quad (3.11)$$

де x_i, y_i – площинні координати точок-орієнтирів p . Основні властивості кривої, що використані під час планування маршруту, побудованого на підставі багаточлена Без'є, такі:

1. Крива гладка, не має розривів.
2. Крива задається набором n -точок $p_0 = (x_0, y_0), p_1 = (x_1, y_1), \dots, p_n = (x_n, y_n)$.
3. Крива починається в точці p_0 і закінчується в точці p_n , через інші точки крива загалом не проходить.
4. Якщо $n = 1$, маємо пряму між точками p_0 і p_1

$$s(t) = (1-t)p_0 + tp_1,$$

якщо $n = 2$ маємо квадратичну параболу, яка визначається точками p_0, p_1, p_2

$$s(t) = (1-t)^2 p_0 + 2t(1-t)p_1 + t^2 p_2,$$

якщо $n = 3$ маємо кубічну параболу з точками p_0, p_1, p_2, p_3

$$s(t) = (1-t)^3 p_0 + 3t(1-t)^2 p_1 + 3t^2(1-t)p_2 + t^3 p_3.$$

5. Відрізки $[p_0, p_1], [p_{n-1}, p_n]$ дотичні до кривої.

6. Операція масштабування не змінює форми кривої через її інваріантність до цього перетворення.

У формулі (3.11) коефіцієнт C_n^i визначається за формулою сполучень з n до i :

$$C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}. \quad (3.12)$$

На практиці алгоритмічних розрахунків для обчислення (3.12) використовується таке рекурентне співвідношення [5]

$$C_n^k = C_{n-1}^k + C_{n-1}^{k-1}. \quad (3.13)$$

Перетворимо (3.11) до зручнішої в обчислювальному відношенні форми. Для цього зважатимемо на те, що C_n^0, C_n^n в (3.11) набувають значення 1, і вираз (3.13), тоді можна отримати таку форму запису багаточлена Без'є для першого виразу (3.11)

$$s(t) = (1-t)^n p_0 + \sum_{i=1}^{n-1} C_{n-1}^i t^i (1-t)^{n-i} p_i + \sum_{i=1}^{n-1} C_{n-1}^{i-1} t^i (1-t)^{n-i} p_i + t^n p_n, \quad (3.14)$$

у якому $p_i = (x_i, y_i)$. З (3.14) можна отримати вираз

$$s(t) = (1-t)^n p_0 + (1-t) \sum_{i=1}^{n-1} C_{n-1}^i t^i (1-t)^{n-i-1} x_i + t \sum_{i=1}^{n-1} C_{n-1}^{i-1} t^{i-1} (1-t)^{n-i} x_i + t^n x_n. \quad (3.15)$$

До (3.15) застосуємо таке угруповання

$$s(t) = (1-t) \left[(1-t)^{n-1} x_0 + \sum_{i=1}^{n-1} C_{n-1}^i t^i (1-t)^{n-i-1} x_i \right] + t \left[\sum_{i=1}^{n-1} C_{n-1}^{i-1} t^{i-1} (1-t)^{n-i} x_i + t^n x_n \right]. \quad (3.16)$$

Зручність (3.16) під час проведення обчислень стає очевидною, якщо розглянути цей багаточлен для $n=1, 2$ і 3 . Так, якщо $n=1$, багаточлен (3.16) має вигляд

$$s(t) = (1 - t)p_0 + tp_1 = R_1, \quad (3.17)$$

якщо $n = 2$,

$$s(t) = (1 - t)[(1 - t)p_0 + tp_1] + t[(1 - t)p_1 + tp_2] = (1 - t)R_1 + tR_2, \quad (3.18)$$

де $R_2 = (1 - t)p_1 + tp_2$;

якщо $n = 3$,

$$\begin{aligned} s(t) = (1 - t)[(1 - t)[(1 - t)p_0 + tp_1] + t[(1 - t)p_1 + tp_2] + t[(1 - t)[(1 - t)p_1 + tp_2] + \\ + t[(1 - t)p_2 + tp_3]] = (1 - t)[(1 - t)R_1 + tR_2] + \\ + t[(1 - t)R_2 + tR_3], \end{aligned} \quad (3.19)$$

і т.д. У (3.16) $R_3 = (1 - t)p_2 + tp_3$.

Введемо далі значення

$$Q_1 = (1 - t)R_1 + tR_2 \quad (3.20)$$

і

$$Q_2 = (1 - t)R_2 + tR_3. \quad (3.21)$$

Вираз (3.19) через (3.20), (3.21) записується у вигляді

$$s(t) = (1 - t)Q_1 + tQ_2. \quad (3.22)$$

Аналіз виразу (3.19) показує, що розрахунок багаточлена Без'є ґрунтується на послідовному обчисленні виразів

$$R_i = (1 - t)p_{i-1} + tp_i \quad (3.23)$$

i

$$Q_{i-1} = (1 - t)R_{i-1} + tR_i, \quad (3.24)$$

де $i = \overline{1, n-1}$.

3.5.2. Алгоритм розрахунку кривої Без'є

Вирази (3.16), (3.19), (3.23), (3.24) дають змогу побудувати алгоритм розрахунку кривої за багаточленом Без'є. Цей алгоритм розрахунку кривої маршруту за заданими точками-орієнтирами подано на рис. 3.13.

Алгоритм включає такі кроки:

1. Введення m -числа точок орієнтирів, $0 \leq m \leq n$, $n \geq 1$.
2. Введення точок-орієнтирів pt .
3. Завдання інтервалу для параметра $t = [0, 1]$ і його кроку Δt .
4. Обчислення R_i для всіх m за формулою (3.23).
5. Обчислення Q_i для всіх $(m-1)$ за формулою (3.24).
6. Обчислення $s(t)$.
7. Зміна кроку Δt .
8. Визначення наступної точки кривої.
9. Якщо досягнутий кінець інтервалу t , алгоритм розрахунку завершений.

Основними перевагами алгоритму є його уніфікованість щодо кількості точок-орієнтирів, відсутність необхідності запам'ятовування проміжних точок розрахунків, можливість організації розрахунку в реальному масштабі часу.

Аналіз алгоритму. Показана на рис. 3.13 схема розрахунку не єдина. Альтернативою цьому алгоритму є схема обчислення, організована безпосередньо за формулою (3.8). Оцінювання цих алгоритмів може бути виконанено за кількістю операцій, потрібних для обчислення точки кривої в межах одного значення Δt .

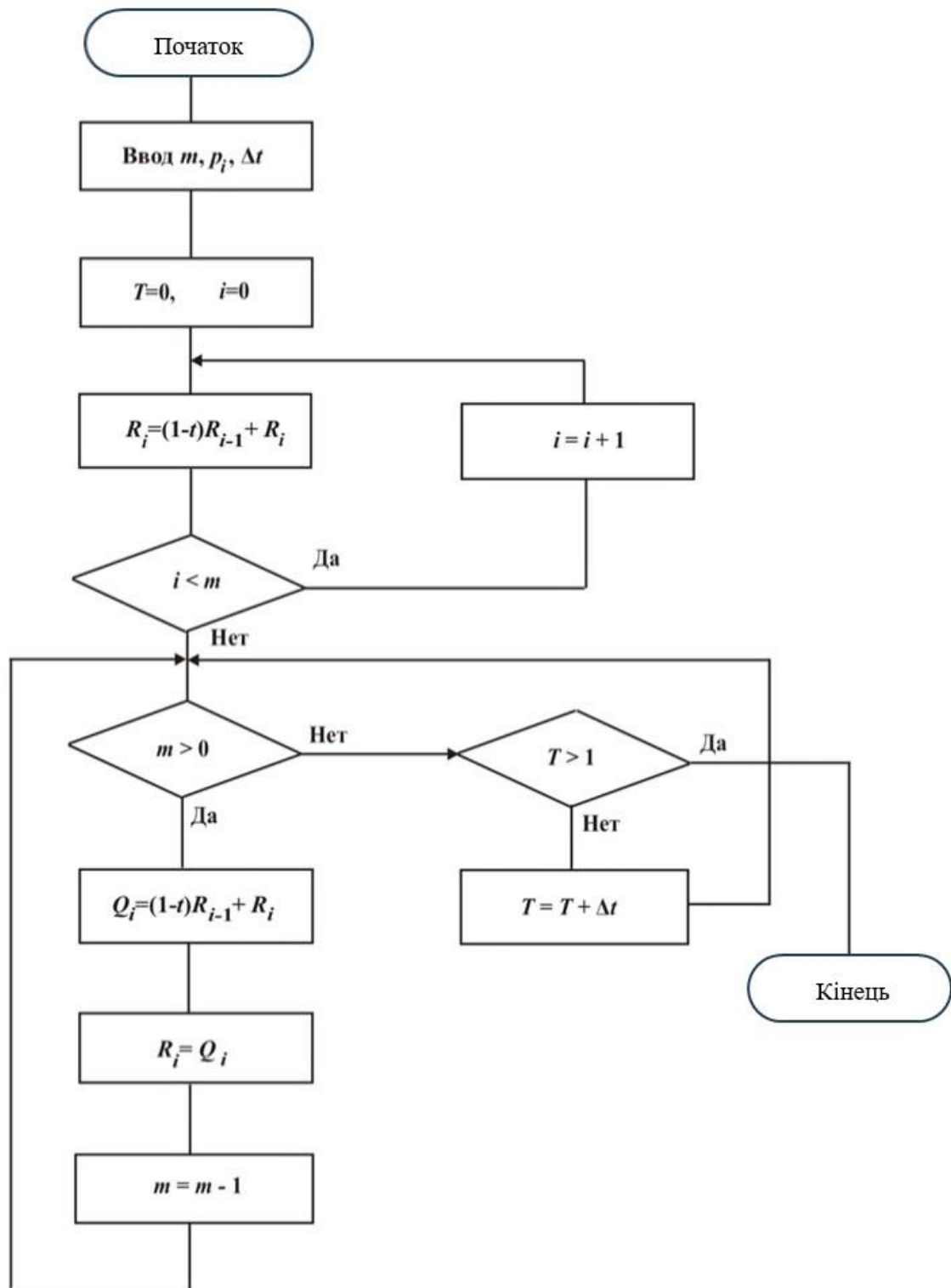


Рис. 3.13. Алгоритм розрахунку кривої маршруту

Якщо алгоритм поданий на рис. 3.13, має $\sum_{k=1}^n 6k$ обчислювальних операцій, то алгоритм, заснований на формулі (3.11), за наявності можливості зберігання масивів t^i , $(1-t)^{m-i}$ і коефіцієнтів C_n^i потребує $k(k+5)$ обчислювальних операцій (див.

також [50, с. 236]). Обидва алгоритми припускають редагування, що корисно під час створення відповідних додатків.

Рекомендації з побудови маршруту на основі кривих Без'є. Насамперед слід зазначити, що під час побудови маршруту слід зважати на те, що крива повинна будуватися в просторових координатах, тобто $p = (x, y, z)$ і система параметричних рівнянь (3.10) має бути доповнена ще одним рівнянням щодо координати z . Загалом алгоритм розрахунку не змінюється, збільшується тільки число обчислювальних операцій.

Якщо початкова та кінцева точки чітко визначені, то виникає необхідність вибору точок-орієнтирів. За відсутності перешкод достатньо вибрати дві точки p_0, p_1 .

В умовах прокладання маршруту з перешкодами на шляху проходження БПЛА, пропонується як координати точок-орієнтирів вибирати координати одиночних перешкод, беручи до уваги властивість (3.10) кривих, тобто маршрут не пролягатиме через перешкоду. Якщо перешкоди складні, тобто коли необхідно прокладати маршрут між перешкодами, пропонується як точки-орієнтири вибирати середню відстань між перешкодами.

Розглянуто алгоритми формування маршруту БПЛА. Їх порівняльний аналіз показує перспективність застосування кривих Без'є, що використовуються у векторній графіці при створенні ліній довільної форми. Основними перевагами кривих Без'є є обмежена кількість маршрутних точок, які задаються, інваріантність щодо операції масштабування, що допомагає зберегти форму кривої в разі зміни масштабу основи (карти), гладкість кривої і відсутність коливальності між маршрутними точками-орієнтирами, що забезпечує задовільну кривизну траєкторії [52–54]. Розглянутий підхід доречно використовувати в середовищі MissionPlanner під час побудови маршруту БПЛА.

Висновки до розділу 3

1. Під час застосування алгоритмів градієнтного спуску як налаштування слід використовувати тільки унімодальні функції навчання, в іншому разі можливе попадання в область локального, а не глобального мінімуму функції помилки навчання. Щоб алгоритм збігався, збільшення вагових коефіцієнтів, а, отже, і швидкість навчання повинні бути малі, але тоді мережа навчається довго за часом. Надмірно висока швидкість навчання призводить до нестійкості процесу. Під час навчання не можна гарантувати, що розроблена мережа стане оптимальною мережею. Як недолік цього підходу можливо визначити, що під час опису математичної моделі нейромережею складної структури ітераційний процес підстроювання параметрів мережі методом градієнтного спуску потребує значних обчислювальних ресурсів; поява нових даних потребує повторного навчання, а значить зберігання всієї вимірювальної інформації.

2. Підвищення ефективності налаштування вагових коефіцієнтів системи “Adaline” під час керування динамічним об’єктом в алгоритмі полягає в тому, що досягається точність відпрацювання завдань із мінімальними часовими витратами та зменшується тривалість налаштування нейроконтролера завдяки додатковому контролю кількості перемикачів та використанню як навчальної точки – фазових координат точки першого перемикачів сигналу управління. Водночас інформація навчання нейроконтролера береться за поточною лінією перемикачів $F(c, X(t))$, яка вибудовується на кожному кроці навчання. Такий алгоритм налаштування, крім кращих характеристик відпрацювання об’єктом завдання, має додаткову можливість навчатися в процесі функціонування системи в разі зміни параметрів об’єкта, які виявляються, наприклад, під час зміни навантаження або його початкового стану. У разі постійно діючого завдання можна значно зменшити час навчання нейроконтролера за допомогою визначення помилкових ситуацій та дострокової корекції вагових коефіцієнтів нейроконтролера.

3. Удосконалено метод формування маршруту БПЛА на основі поліномів Без’є, що використовуються у векторній графіці під час створення ліній довільної

форми, перевагою яких є обмежена кількість маршрутних точок, які задаються, інваріантність щодо операції масштабування, що дає змогу зберегти форму кривої в разі зміни масштабу основи (карти), гладкість кривої і відсутність коливальності між маршрутними точками-орієнтирами, що забезпечує задовільну кривизну траєкторії.

Список використаних джерел до розділу 3

1. Ямпольський Л. С., Лісовиченко О. І., Олійник В. В. Нейротехнології та нейрокомп'ютерні системи: підручник. Київ : Дорадо-Друк, 2016. 571 с.
2. Руденко О. Г., Бодянський Є. В. Штучні нейронні мережі. Навч. посіб. Київ: СМІТ, 2006. 404 с.
3. Зайченко Ю. П. Нечіткі моделі та методи в інтелектуальних системах. Київ: Вид. дім «Слово», 2008. 354 с.
4. Xu X. and Tsai W.T. Effective neural algorithms for the traveling salesman problem. *Neural Networks*. 1991. Vol. 4, pp. 193–205.
5. Smith K., Palaniswami M., Krishnamoorthy M. Neural techniques for combinatorial optimization with applications. *IEEE transactions on neural networks*, 1998. Vol. 9, No. 6, pp. 1301–1318.
6. Looi C. K. Neural network methods in combinatorial optimization. *Computers and Operations Research*. 1992. Vol.19, No 3/4, pp. 191–208.
7. Hopfield J., Tank D. Neural computation of decisions in optimization problems. *Biological cybernetics*, 1985. Vol. 52, No 3, p. 141–152.
8. Hopfield J. Neural Networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *In Proc. National Academy of sciences, USA*, 1982, pp. 2554–2558.
9. Zhong Jing, Feng Yuelei, Tang Shuyu, Xiong Jiang, Dai Xiangguang & Zhang Nian. A collaborative neurodynamic optimization algorithm to traveling salesman problem. *Complex & Intelligent Systems*. Published: 13 October 2022. Vol. 9, 2023, pp.1809–1821.
10. Тенк Д. У., Хопфилд Дж. Дж. Колективні обчислення на нейроподібних електронних схемах. *Світ науки*.1988. № 2. С. 44–53.

11. Behzad Kamgar-Parsi and Behrooz Kamgar-Parsi. On problem solving with Hopfield neural network. *Biological cybernetics*. 1990, Vol. 62, pp. 415–423.
12. Kohonen T. Self-organization and Associative Memory. – Berlin: Springer Verlag, 1984. 501 p.
13. Kohonen T. Self-organization Maps. Springer: Berlin – Heidelberg, 1997. 420 p.
14. Fort J.C. Solving a combinatorial problem via self-organizing procession application of the Kohonen algorithm to the travelling salesman problem. *Biological cybernetics*. 1988, Vol. 59. № 1, pp. 33–40.
15. Favata F., Walker R. A study of the application of Kohonen-type neural network to the travelling salesman problem. *Biological cybernetics*. 1991. Vol. 64. № 6, pp. 463–468.
16. Tinarut Pongpinyo, Leksakul Komgrit. Hybrid Self-Organizing Map Approach for Traveling Salesman Problem. *CMU J. Nat. Sci.* Vol. 18. No 1. 2019, pp. 27–37. DOI: 10.12982/CMUJNS.2019.0003.
17. Nielsen Michael. Neural Networks and Deep Learning. B0DTVSM TJS. 2016. 224 p.
18. Zade L. Fuzzy logic, neutral networks and soft computing. *Communications of the ACM*. 1994. Vol. 37. №3, pp. 77–84.
19. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень: теорія, синтез, ефективність / В. А. Тарасов, Б. М. Герасимов, І. А. Левин, В. А. Корнейчук. Київ: МАКНС, 2007. 336 с.
20. Герасимов Б. М., Тарасов В. А., Токарев І. В. Людино-машинні системи ухвалення рішень з елементами штучного інтелекту. Київ: Наукова думка, 1993. 184 с.
21. Використання штучного інтелекту – сучасна тенденція розвитку озброєння / Б. М. Герасимов, Д. П. Кучеров, З. Н. Копилова, В. Г. Мякухин // *Артилерійське та стрілецьке озброєння*. 2007. Спецвипуск. С. 36–42.

22. Застосування методів штучного інтелекту в управлінні проектами / Н. М. Бабинін, В. Я. Жихарєв та ін.; под ред. А.Ю. Соколова. Харків: НАКУ ім. Жуковського «ХАІ», 2002. 474 с.

23. Гостєв В.І. Синтез нечітких регуляторів систем автоматичного керування. Київ: Радіоаматор, 2005. 708 с.

24. Порівняльна оцінка якості фаззи-систем автоматичного регулювання потужності передавача в радіоканалі зв'язку при дії мультиплікативних та адитивних збуджуючих діянь: Зб. наук. пр. ВІКНУ / В .І. Гостєв, Н. І. Кунах, В. В. Гостєв, О. М. Бережний. Вип. 2. Київ: ВІКНУ, 2006. С. 48–55.

25. Benhidjeb A., Gissinger G.L. Fuzzy control of an overhead crane performance comparison with classic control . *Int. Jo. Control engineering practice*. 1995. Vol. 3, № 12, pp. 168 –1696.

26. Matthews C., Swatman P. A. Fuzzy concepts and formal methods: some illustrative examples. *In the second Australian workshop on requirements engeneering (AWRE'97)*. Sydney: Macquarie University, 1997, pp. 99–114.

27. Olsson Gustaf, Piani Gian Guido. Computer Systems for Automation and Control (Prentice Hall International Series in Systems and Control Engineering). Prentice Hall, 1992. 428 p.

28. Ashour M. Adaptive neural control of NPR / M. Ashour, A. Aboshosha. *Proceeding of Al Azhar Engineering Fifth International Conference AEIC-97*, Cairo, Egypt, December 1997, pp. 19–22.

29. Widrow B. Practical application for adaptive data processing systems / B. Widrow, G.F. Groner, M.J. Hu, F.W. Smith, D. Specht, L.R. Talbert // *WESCON Techn. Papers*. Vol. 11/4. № 7. 1963. P. 158–169.

30. Kuo C.-W., Tsai C.-C., Lee C.-T. Intelligent Leader-Following Consensus Formation Control Using Recurrent Neural Networks for Small-Size Unmanned Helicopters. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 51. No 2, art. No. 8651430. 2021, pp. 1288–1301. DOI: 10.1109/TSMC.2019.2896958.<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=>

2-s2.0-85099766649&doi=10.1109%2fTSMC.2019.2896958&partnerID=40&md5=76e508867db04a8d162218a704ad7022.

31. Noriega J.R., Wang H. A direct adaptive neural-network control for unknown nonlinear system and its application. *IEEE Trans. Neural networks*. 1998. Vol. 9. № 1. P. 27–34.

32. Levente Kovács, Tamás Haidegger, Anikó Szakál. Recent Advances in Intelligent Engineering: Volume Dedicated to Imre J. Rudas' Seventy-Fifth Birthday (Topics in Intelligent Engineering and Informatics, 18). Springer. 2024. 331 p.

33. Rosenblatt, F. Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. Washington, DC: Spartan Books, 1962. 648 p.

34. McCulloch W.S., Pitts W. A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity. *Bull. Mathematical Biophysics*. Vol. 5. 1943. P. 115–133.

35. Werbos P. Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences. *Phd Thesis, Dept. of Applied Mathematics*, Harvard University, Cambridge, Mass., 1974.

36. Васильєв В. І. Розпізнавальні системи: довідник. Київ: Наукова думка, 1983. 422 с.

37. Weins Danny. An Introduction to Self-adaptive Systems: A Contemporary Software Engineering Perspective. John Wiley & Sons. 2020. 288 p.

38. Billard Aude, Mirrazavi Sina and Figueroa Nadia. Learning for Adaptive and Reactive Robot Control. A Dynamical Systems Approach. The MIT Press. Pub date: February 1, 2022. 424 p.

39. Craig John J. Introduction to Robotics. Mechanics and Control. Third Edition. Pearson Education, Inc. 2005. 408 p.

40. Munson John H. Robot planning, execution, and monitoring in an uncertain environment. Paper accepted for presentation at Second IJCAI, London, England, September 1–3, 1971. 14 p.

41. Biao Wang, Yaxiam Xin, Chao Chen, Ziao Song, Baoghuai Sun and Tiuanshuai Guo. Whole-Body Control with Uneven Terrain Adaptability Strategi for Wheeled-

Bipedal Robots. *Electronics*. 2025, 14(1) 198. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics14010198>.

42. Efe M.O. A novel error critic for variable structure control with an ADALINE. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. Vol. 24. Issue 5. 2002. P. 403–415.

43. Спосіб настроювання вагових коефіцієнтів системи "Adaline" при керуванні динамічними об'єктами: Пат. № 81997 Україна, МПК G 05 B 13/00, G 05 B 11/00. / Д. П. Кучеров; заявник та патентовласник ЦНДІ ОБТ ЗС України. Заявл. 2.06.06; опубл. 25.02.08, Бюл. № 4. 6 с.

44. Кучеров Д. П., Дихтяренко В. Н., Козуб А. М. Алгоритм налаштування вагових коефіцієнтів нейроконтролера під час управління динамічними об'єктами. *Нейросітьові технології та їх застосування*: Зб. наук. пр. Всеукр. Наук. конф. з міжнар. уч., 11 грудня 2013 р. Краматорськ: Донбаська державна машинобудівна академія, 2013. С. 17–25.

45. Дихтяренко В. Н., Кучеров Д. П., Козуб А. М. Алгоритм налаштування вагових коефіцієнтів нейроконтролера при керуванні динамічними об'єктами. *Науковий вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2014. № 2 (14Е). С. 27–35.

46. Новіченко А. С., Артёмова А. В. Проблеми та задачі планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об'єктів. *Системи обробки інформації*. 2024. Вип. 2 (177). Харків: ХАІ. С. 32–40. DOI: 10.30748/soi.2024.177.04.

47. Bortoff S. A. Path Planning for UAVs. *Proceedings of the American Control Conference*, June 2000, Chicago, Illinois, pp. 364–368.

48. Dubins L. E. On curves of minimal length with a constraint on overage curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *AM. J. Math.* 1957. 79. P. 497–516.

49. Xu C., Xu M., Yin C. Optimized multi-UAV cooperative path planning under the complex confrontation environment. *Computer Communications*, Vol. 162. 2020,

pp. 196–203. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.04.050 URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090419488&doi=10.1016%2fj.comcom.2020.04.050&partnerID=40&md5=254ebff5d78cf1aa5e370d6c2f2b20e4>.

50. Hughes John F. Computer Graphics: Principles and Practice. Addison-Wesley, 2014. 1209 p.

51. Кучеров Д.П., Голенківська Т.І., Жданов С.В., Рудаков В.І., Станіщук А.Б., Твердохлібов В.В., Козуб А.М. Спосіб формування маршруту безпілотного літального апарата: Пат. № 117211. Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 26.06.2017.

52. Aggarwal S., Kumar N. Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges. Computer Communications, 149, 2020, pp. 270–299. DOI: 10.1016/j.comcom.2019.10.014. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074212080&doi=10.1016%2fj.comcom.2019.10.014&partnerID=40&md5=9917286a251c532c1e8476ab1624f3ad>.

53. Kuchеров D., Kozub A. Path planning unmanned aerial vehicles in complex flight conditions: матеріали доповідей XI Міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)», 9–11 жовтня 2012 р. Вінниця: Вінницький науково-технічний університет, 2012. С. 179.

54. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Алгоритм керування обмеженою групою БПЛА: матеріали XX Міжнар. конф. з автом. управ. «Автоматика / Automatics – 2013», 25–27 вересня 2013 р. Миколаїв: Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. 2013. С. 242–243.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ГРУПОВОГО ПОЛЬОТУ

Розглянуто методологічні основи моделювання групового польоту, що передбачають: визначення основної конфігурації групи, яка має лідера, вимоги до дій групою БПЛА; зосереджено увагу на проблемі консенсусу до дій у групі; визначено сигнали управління, які дають змогу формувати функціонально стійке управління завдяки діям в створюваному сигналами управління потенціальному полі сил тяжіння та відштовхування, також запропоновано шарову структуру побудови системи управління. Отже, розглянуто багатоагентну систему (Multi-Agent System), що складається з кількох автономних інтелектуальних агентів, які взаємодіють між собою для досягнення спільної мети або кількох цілей. Кожен агент має свою мету, свої знання, свою логіку і може приймати рішення самостійно, але вони домовляються, узгоджують дії, вирішують конфлікти. БПЛА є агентами які виконують колективні завдання.

4.1. Груповий політ з лідером

Запропоновано виконання завдання щодо управління групою БПЛА, які рухаються за заданим маршрутом. Група розглядається як формування обмеженого розміру, що складається з n -агентів, які рухаються відносно лідера, що дає змогу розглянути групу як деяку сукупність із центром руху. Кількісний склад групи може змінюватися за збереження цілісності групи. У розділі пропонується використовувати гладкі закони, що регулюють рух групи. Безпека руху забезпечується введенням у закон контрольованих компонентів, еквівалентних створенню притягувальних і відштовхувальних полів.

Розглянемо дії групи БПЛА, що виконує завдання моніторингу повітряного простору. Позначимо окремий БПЛА, який є частиною групи, об'єктом A_i . Введемо евклідовий простір $X Y Z$ для опису поточного положення A_i в просторі. Нехай здійснюється довільний рух об'єктів S_i в обраному просторі. Для виконання

завдання об'єкти збираються в групу, здійснюють груповий політ, польотну місію, а потім завершують політ у заданій точці. Відповідне польотне завдання показане на рис. 4.1, яке виконується групою з чотирьох БПЛА.

Також на цьому рисунку подано маршрут групи, на якому є перешкоди природного походження або одиночні будівлі. Під час визначення місії не враховано наявності перешкод.

Групі не рекомендується маневрувати за висотою, а тому під час польоту приймається рішення щодо варіанта огинання перешкоди. Група рухається з постійною швидкістю, отже, швидкості окремих об'єктів групи досить близькі, тому група з метою дослідження може бути описана деяким утворенням, яку названо агрегацією, яка має центр, що відповідає позиції лідера групи. Передбачається, що агент має необхідне керувальне, навігаційне та комунікаційне обладнання для підтримки польоту. Також планується можливість зміни кількості елементів груп на основі протоколів узгодження.

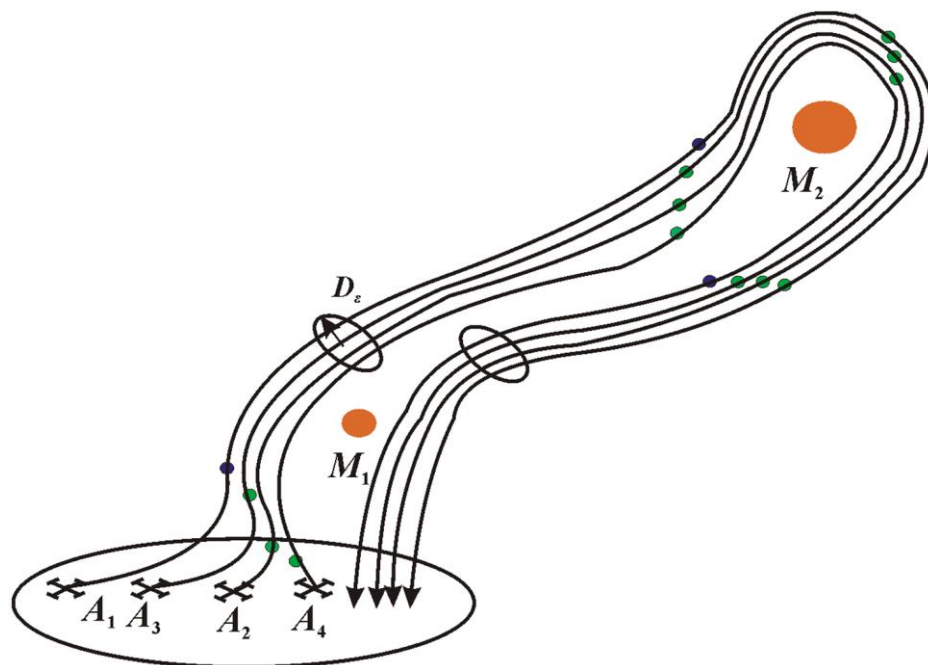


Рис. 4.1. Група з чотирьох БПЛА

Розглянемо наявність перешкоди на траєкторії маршруту. Відповідно до цього прогнозу запропонована траєкторія руху передбачає прямолінійні і

криволінійні частини руху. Визначемо рух агента в тривимірному евклідовому просторі. Положення агента описується деякими позиціями p_i з координатами $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ і керувальним сигналом u_i . Беручи до уваги управління агентами багатоагентної системи, можна використовувати динамічну модель інтегратора другого порядку, а саме:

$$\ddot{p}_i(t) = k_i u_i(t). \quad (4.1)$$

У рівнянні (4.1) k_i – коефіцієнт, що описує реакцію i -го агента, $t \geq 0$ – час. Введемо також параметр $D_\varepsilon > 0$, який визначає розмір багатоагентної системи, що становить її сукупність для $\forall t \rightarrow \infty$, тобто

$$p_i \rightarrow D_\varepsilon(p_c). \quad (4.2)$$

Це свідчить про те, що лідер є агентом, розташованим у центрі групи

$$p_c(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i(t), \quad (4.3)$$

і

$$D_\varepsilon(p_c) = \{p \in \mathbb{R}^3 : d = \|p - p_c\| < \varepsilon\}. \quad (4.4)$$

У (4.4) ε виступає як конструктивний параметр, що задає безпечну відстань між агентами. Отже, формула (4.4) слугує критерієм цілісності групи. Слід зазначити, що конфігурація групи може змінюватися, але нерівність

$$D_{p_c} \leq D_\varepsilon(p_c) \quad (4.5)$$

для групи завжди виконується.

Поставимо завдання синтезувати закон управління, який забезпечує рух групи на маршруті зі стаціонарними перешкодами за умови, що забезпечується умова цілісності групи (4.5).

4.2. Протоколи консенсусу інформаційної системи на основі БПЛА в умовах перешкод

Протоколи консенсусу під час виконання автономного групового польоту забезпечують живучість БПЛА.

Інформаційна система зазвичай функціонує за умов впливу чинників, що знижують її ефективність. На інформаційну систему, що становить групу БПЛА, діють перешкоди в каналах зв'язку та управління, можливі несправності самих елементів, неправильна робота системи управління. Ефективна діяльність системи визначається ефективним та злагодженим виконанням алгоритмів управління, що входять до неї. Така діяльність і визначає живучість інформаційної системи.

В аналізованій інформаційній системі злагодженість повинна досягатися безшовною роботою алгоритмів, що забезпечується протоколами, що вводяться. БПЛА утворюють вузли інформаційної системи, кожен вузол обробляє повідомлення. Однак, через різномірність вузлів, унаслідок завантаження пакетів можливі затримки через навантаження, втрати, помилки, невизначеності під час приймання повідомлень. Своєчасне залучення протоколів забезпечує живучість усієї інформаційної системи.

У роботі досліджено механізми взаємодії різних протоколів функціонування з метою забезпечення безшовної роботи інформаційної системи.

Формулювання проблеми. Розглянемо завдання управління рухом команди з n -членів у площині, динаміка кожного може бути подана подвійним інтегратором

$$\begin{aligned}\dot{p}_i &= v_i, \\ \dot{v}_i &= u_i,\end{aligned}\tag{4.6}$$

де $p_i = (x_i, y_i)$ – вектор координат положення i -го агента на площині; $v_i = (\dot{x}_i, \dot{y}_i)$ – вектор координат швидкості i -го агента; $u = (u_x, u_y)$ – вектор вхідних сигналів, який задає пришвидшення об'єкта. Відносна положення між агентами i та j утворює співвідношення $p_{ij} = p_i - p_j$. Керувальна дія становить пару компонентів, наприклад, компонент a_i призначений для вирівнювання швидкості всіх агентів, а другий b_i спрямований на унеможливлення зіткнень та зосереджень у групі. Останній компонент є негативним градієнтом деякої штучної потенціальної функції V_i . Передбачається, що зіткнення між агентами неможливі, якщо відстань між ними не менше деякого r , що може слугувати радіусом кола, центром якого є i -й агент.

Якщо r малий, то зіткнення між агентами групи можливі, у протилежному випадку, коли r велике, то агенти залишаються сусідами як завгодно довго. Через це важливо зберегти цілісність групи.

Передбачається, що кожен агент інформує своїх сусідів у певний дискретний момент часу t_k , тоді структура комунікації в цей час описується графом $G_k = \{v, e(k)\}$, де v – безліч вершин графа; $e(k)$ – ребра графа у момент часу t_k . $E(k)$ зручно уявити $v \times v$ матрицею, в якій елемент (i, j) означає зв'язок i -го агента з j -м.

Вводиться кількість сусідів i -го агента $N_i = \{j | (i, j) \in e(k)\}$ в момент часу t_k . Введемо також матрицю A_k , яка є матрицею суміжності графа G_k і має відмінні від нуля елементи $a_{ij} > 0$, якщо $j \in N_i$, і $a_{ij} = 0$, інакше, тобто $j \notin N_i$. Матриця Лапласіана цього графа запишеться як $L_k = D_k - A_k$, де $D_k = d(i, j)_{N \times N}$.

$$d(i, j)_{N \times N} = \begin{cases} \deg(v_i), & \text{if } i = j, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4.7)$$

Граф G_k має вигляд остовного дерева, якщо існує вузол, що має шлях у кожний інший вузол. Якщо існують графи $G(k_0), G(k_1), \dots, G(k_l)$, тоді їхнє об'єднання визначається як $\bigcup_{i=k_0, k_1, \dots, k_l} G_i = G_k$.

Окрім того, вважатимемо, що існує стохастична матриця P розміру $N \times N$, елемент $p_{ij} > 0$ для всіх $i, j \in v$, $\sum_{j=1}^N p_{ij} = 1$.

Завдання полягає в тому, щоб синтезувати розподілений закон управління членами команди u_i , що підтримують зв'язність у групі, синхронність руху агентів і одночасно забезпечують рух у групі без зіткнень та зосереджень, а також забезпечують відстані між кожною парою у групі не менше заданого значення P .

Детально методику проблеми живучості на основі досвіду проектування та бойового застосування літальних апаратів викладено в [1]. Основні результати роботи прямо інтерпретуються до сучасних БПЛА та керованих ракет.

Обговорення проблеми живучості в різних галузях країн світу, а також огляд наявних методів статистики та сучасніших методів машинного навчання, а також їх класифікацію наведено в [2].

Деякі ризик-орієнтовані методи гарантування безпеки, захищеності та живучості, за допомогою яких визначаються механізми, де традиційно виконуються ці вимоги, розглянуті в [3].

У [4] запропоновані методи обміну інформацією мережі між кореспондентами в умовах випадкових і навмисних програмних перешкод, які описані в моделі деградації мережі, заснованої на теорії перколяції. Адаптація мереж в умовах впливу чинників, що дестабілізують зовнішнє середовище, досягається вибором з допустимих альтернатив структури мережі, а також вибором найкращих рішень щодо відновлення зв'язку між транзитними вузлами.

Уніфіковану мову SecAM аналізу живучості різних рішень безпеки перед розгортанням системи, що дає змогу моделювати критично важливі інфраструктури на ранніх етапах життєвого циклу розроблення системи, репрезентовано у роботі [5]. Кількісна оцінка мінімізації збитків від атак у мережі отримана за результатами узагальнених стохастичних мереж Петрі.

Розподілений криптографічний механізм, реалізований на основі консенсусного протоколу мережі Blockchain, описано в [6]. Протокол передбачає управління від центрального вузла, механізм передбачає наявність основного вузла в розподіленій системі, з яким погоджуються всі вузли системи, і стверджують те саме значення для консенсусу.

У [7] наведені результати дослідження, спрямованого на оцінювання адаптивних та предиктивних моделей управління у конфліктних ситуаціях, які вирішуються диспетчерами управління повітряним рухом. Під час дослідження запропонована безшовна модель інтеграції людини та засобів автоматизації, що дає змогу спрогнозувати час настання конфлікту та запобігти йому.

У [8] досліджено адаптивну систему керування дорожнім трафіком на основі реалізації механізму навчання з підкріпленням (RL) світлофора. Безшовність трафіку (скорочення заторів) досягається завдяки вивченню довжини черги і задіяння розробленого алгоритму управління перемиканням сигналів світлофора на перехрестях.

У роботі [9] подано рішення до протоколу безшовного резервування для мереж Ethernet, що забезпечує дві копії кожному відправленому клієнту, які ґрунтуються на швидкому видаленні дублюючої копії.

Методологію безшовного керування мікромережею, що складається з фотогальванічного та дизельного генераторів, запропоновано у статті [10]. Управління мікромережею здійснюється алгоритмами контролю моменту максимальної потужності фотоелектричної системи та відхилення частоти мікромережі від номінального значення.

У роботі [11] розглянуто підходи до безшовних проєктів у лікувальній практиці, що ґрунтуються на груповому послідовному підході, методі комбінованого тесту та адаптації за Даннетом.

У роботі [12] описано фотогальванічна (ФЕ) систему накопичення енергії (БЕС), що працює як у мережевому, так і в автономному режимах на основі виконання багатofункціональних операцій, включно з компенсацією реактивної потужності, балансуванням потужності та підвищенням якості електроенергії. Система PV–BES забезпечує безперебійне електропостачання критичних навантажень навіть за плавного переходу з мережевого режиму в ізольований і навпаки.

Дослідження [13] пропонує методологію комплексного оцінювання та моделювання з оцінювання довкілля на основі розроблення сценаріїв з акцентом на SEAMLESS-IF.

Розв’язання проблеми. Є група з ідентичних N -агентів. Закон управління залежить лише від інформаційної доступності i -го агента. Передбачається, що виміряний стан i -го агента, що визначається координатами положення швидкості вбудованими датчиками, передається найближчим сусідам з деякою дискретністю t_k (рис.4.2).

Оскільки стан j -х об’єктів надходить у дискретні моменти часу, тому сам агент є дискретною системою. За таких умов система (4.6) трансформується

$$\begin{aligned} p_i(t_k) &= p_i(t_{k-1}) + v_i^+(t_{k-1}), \\ v_i(t_k) &= v_i(t_{k-1}) + u_i^+(t_{k-1}), \end{aligned} \quad (4.8)$$

де $v_i^+(t_k) = v_i T$, і T – інтервал дискретизації, $t_k = kT$.

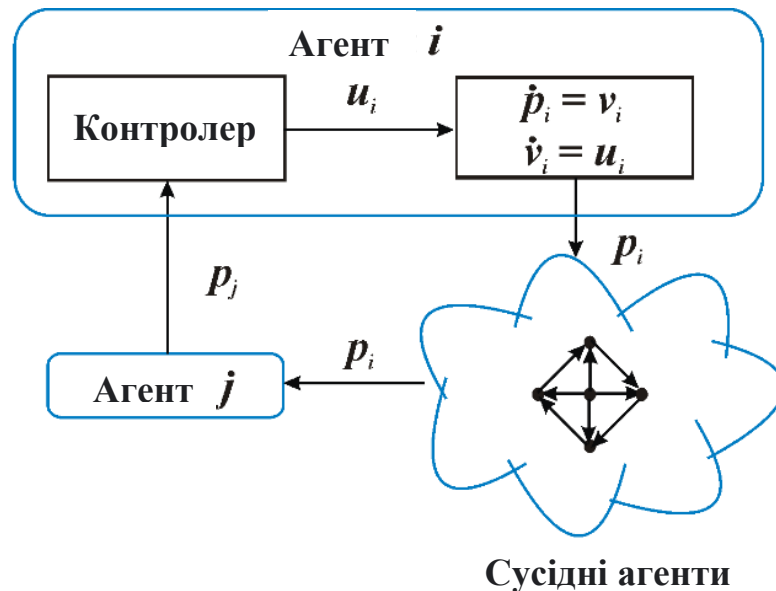


Рис. 4.2. Інформаційна взаємодія між агентами групи

Вводимо вектори

$$x_i(t_{k-1}) = (p_i(t_{k-1}), v_i^+(t_{k-1})); \quad (4.9)$$

$$v_i(t_{k-1}) = (v_i(t_{k-1}), u_i^+(t_{k-1})). \quad (4.10)$$

Тоді розв'язання системи рівнянь у розширеному просторі станів має вигляд

$$x_i(t_k) = e^{AT} x_i(t_{k-1}); \quad (4.11)$$

$$v_i(t_k) = e^{A^+T} u_i^+(t_{k-1}), \quad (4.12)$$

де

$$A = \begin{pmatrix} 0 & I_N \\ \alpha & \beta \end{pmatrix}, \quad (4.13)$$

Протягом інтервалу дискретності T систему (4.8) зручно подати в матричному вигляді

$$\dot{x}_i(\lambda) = Ax_i(\lambda) + Bu_i(\lambda); \quad (4.14)$$

$$y_i(\lambda) = Cx_i(\lambda) + Du_i(\lambda). \quad (4.15)$$

Тут A – матриця агента розмірністю $n \times n$; B – матриця управління чи входу розмірністю $n \times m$; C – матриця виходу розмірністю $l \times n$ і матриця компенсації D розмірністю $l \times m$, де m – число входів; l – число виходів; n – розмір вектора стану агента. Час λ змінюється від 0 до T . Якщо $kT < t < [k+1]T$, то $\lambda = T - kT$. Початкові умови для i -го агента, що описуються рівняннями (4.14), (4.15) знаходяться з рівняння

$$x_i(kT^+) = G_x x_i(kT) + G_u u_i(kT), \quad (4.16)$$

де $x_i(kT)$ та $u_i(kT)$ – значення вектора стану та вектора входу до моменту надходження нової інформації ($[k-1]$ -й період); $x(kT^+)$ – після отримання інформації (k -й період) i -го агента.

Матриці G_x , G_u показують зміну компонентів відповідних векторів під час надходження інформації.

На інтервалі розв'язання рівнянь (4.14), (4.15) дістаємо у вигляді

$$x_i(\lambda) = \Phi(\lambda)x_i(kT^+) + \int_0^\lambda \Phi(\lambda - \tau)Bu_i(\tau)d\tau, \quad (4.17)$$

де $\lambda = t - kT$; $\Phi(t) = e^{A\lambda}$. Переходячи від змінної λ до змінної t , отримуємо

$$x_i(t) = \Phi(t - kT)x_i(kT^+) + \int_{kT}^t \Phi(t - \tau)Bu_i(\tau)d\tau. \quad (4.18)$$

Відповідно, вектор виходу $y(t)$ отримуємо підстановкою вектора (4.18) у рівняння (4.16)

$$y_i(t) = C\Phi(t - kT)x_i(kT^+) + \int_{kT}^T \Phi(t - \tau)Bu_i(\tau)d\tau + D_{u_i}(t). \quad (4.19)$$

Рівняння (4.18), (4.19) визначають зміну вектора x_i i -го агента та його вихід в інтервалі $kT < t \leq (k + 1)T$. Перехід від k -інтервалу $(k+1)$ -го здійснюється через рівняння (4.16), яке дає змогу отримати початкові умови $(k+1)$ -го інтервалу зміни вектора стану. Значення вектора $x([k+1]T)$ в кінці k -го інтервалу знаходять з виразу (4.18) при $t = (k+1)T$:

$$x_i([k + 1]T) = \Phi(T)x_i(kT^+) + \int_{kT}^{(k+1)T} \Phi([k + 1]T - \tau)Bu_i(\tau)d\tau. \quad (4.20)$$

Підставляючи вектор (4.21) та $u_i([k+1]T)$ у рівняння (4.17), дістаємо $x([k+1]T^+)$.

Закон управління i -го агента має вигляд

$$u_i(t) = \alpha v_i(t_k) + \beta \sum_{j \in N} d_{ij}(k) (y_j(t_k) - y_i(t_k)), \quad (4.21)$$

де $t_k \leq t < t_{k+1}$, α , β – невідомі позитивні коефіцієнти, вибрані з умови забезпечення консенсусу та сталого керування.

Аналіз динаміки групи. Цей аналіз передбачає послідовну зміну стану кожного агента відповідно до алгоритму:

1. Введення вихідних даних i -го агента.
2. Розрахунок вектора виходу i -го агента з дискретністю T всередині k інтервалу.
3. Зміна початкових умов інтервалу kT .
4. Розрахунок вектора виходу $y(kT^+)$.
5. Перехід до нового інтервалу та п. 2.

Наглядні приклади. Розглянемо групу, що складається з 5 і 10 ідентичних агентів, в умовах обміну інформацією каналами управління близькими до реальних. Група відпрацьовує маневр однією з площинних координат, наприклад, за висотою. Для виконання протоколу параметри $\alpha = 1$, $\beta = 1$ вибрано за умови забезпечення сталого керування та заданого протоколу консенсусу. Агенти незалежно один від одного приймають рішення щодо формування керувальних впливів для відпрацювання маневру за мінімальний час. Управління групою, що складається з 5-ти агентів з відомими параметрами, показано на рис. 4.3, а з 10-и агентів на рис. 4.4. Відпрацювання маневру відбувається щодо помилки вихідного положення та кінцевого, за якого досягається консенсус. Тому початкове значення помилки велике, а кінцеве мале. Відповідно до обраних позначень у рівняннях (4.18)–(4.20) помилка консенсусу подана величиною y .

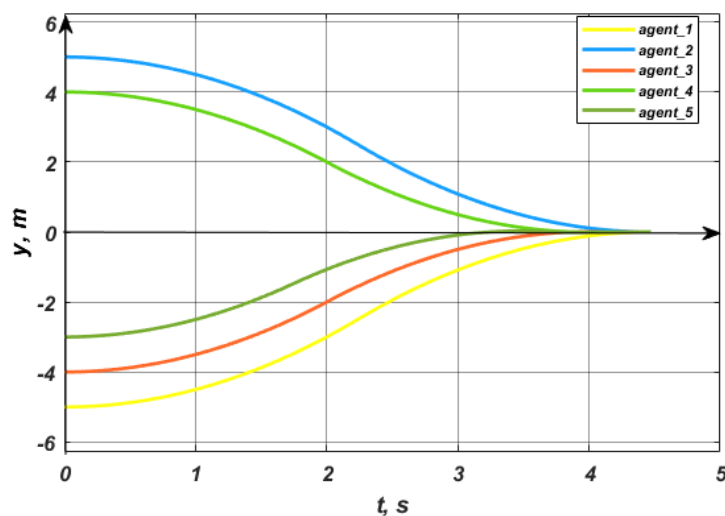


Рис. 4.3. Відпрацювання протоколу консенсусу групою із 5-и агентів

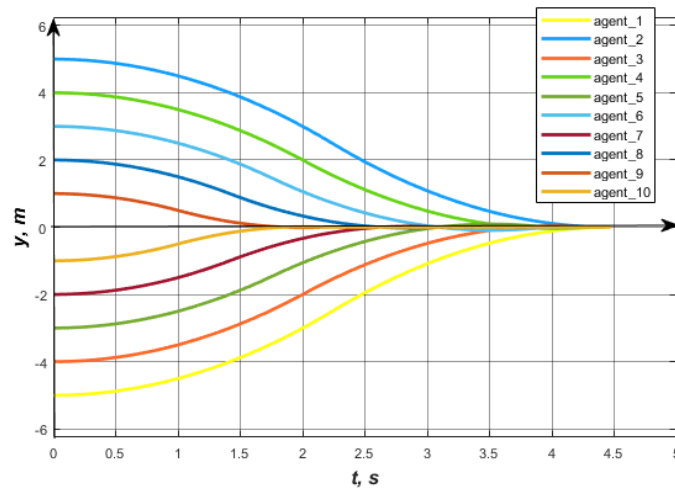


Рис. 4.4. Відпрацювання протоколу консенсусу групою із 10-и агентів

Динаміка кожного агента виконана відповідно до рівнянь (4.18)–(4.20). Моделювання відпрацювання консенсусу [14, 15], подане на рис. 4.3, 4.4, виконано за допомогою інструменту моделювання Simulink пакету інженерних обчислень Matlab R2017a, розгорнутого на ноутбучі IdeaPad 320 Lenovo.

4.3. Поняття про потенціальні поля притягування-відштовхування. Груповий політ на основі створення потенціального поля

Як вже зазначалося, припускаємо, що система управління агентом має засоби вимірювання та обчислювальні засоби, які дають змогу перетворювати результати вимірювань у сигнали, еквівалентні притягувальним і відштовхувальним силам. Сила тяжіння забезпечує цілісність групи, тоді як сили відштовхування допомагають уникати зіткнень один з одним і з перешкодами. Виникнення таких сил дає можливість підтвердити існування потенціальних енергій притягіння і відштовхування.

За визначенням [1] потенціальна енергія, що притягує, записується відповідно до виразу

$$E_{att}(\Delta p) = \frac{1}{2} \mu (\Delta p^2), \quad (4.22)$$

де $\mu > 0$ – масштабний коефіцієнт, а $\Delta p_i = \|p_i - p_c\|$ – евклідова відстань між агентом і лідером групи. Форму гомогенного поля потенціалу в полі агента-лідера показано на рис. 4.5. Вплив цього поля найбільший на краях і ослаблений у центрі, де розташований лідер. Сила, що генерується цим полем, визначається виразом [16, 17]

$$u_{att}(\Delta p) = -grad E_{att}(\Delta p) = -\mu(\Delta p). \quad (4.23)$$

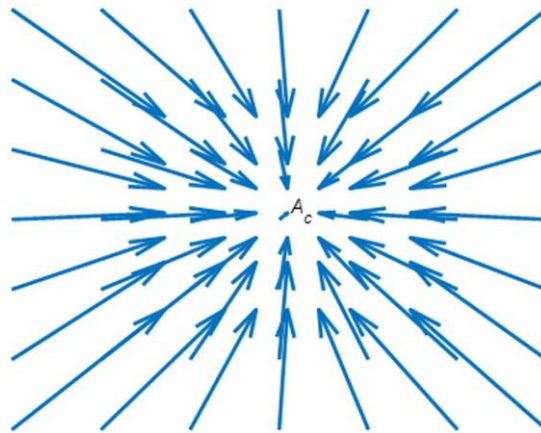


Рис. 4.5. Поле притягування, що діє на агента A_c

Енергія відштовхувального поля має вигляд [10]

$$E_{rep}(\Delta p_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} v \left(\frac{1}{\Delta p_i} - \frac{1}{d_0} \right)^2, & \text{if } \Delta p_i \leq d_0 \\ 0, & \text{if } \Delta p_i > d_0 \end{cases}, \quad (4.24)$$

У цьому виразі $v > 0$ також є масштабним коефіцієнтом, а $d_0 > 0$ – певною константою, що визначає мінімальну відстань до найближчого сусіднього агента. Форму цього поля зображено на рис. 4.6, дія цього поля протилежна притягуванню, тому найсильніше відштовхування відбувається в центрі і слабке на краях області агрегації.

Аналогічно (4.24) покажемо силу відштовхування за допомогою виразу

$$u_{rep}(\Delta p_i) = -grad E_{rep}(\Delta p_i) = \begin{cases} v \left(\frac{1}{\Delta p_i} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{1}{(\Delta p_i)^2} \frac{p_i - p_0}{d_0}, & \text{if } \Delta p_i \leq d_0, \\ 0, & \text{if } \Delta p_i > d_0 \end{cases}, \quad (4.25)$$

де p_i – найближчий агент до p_0 або перешкоди p_M , і

$$d_0 = \max_{1 \leq i \leq N} |p_i - p_0|.$$

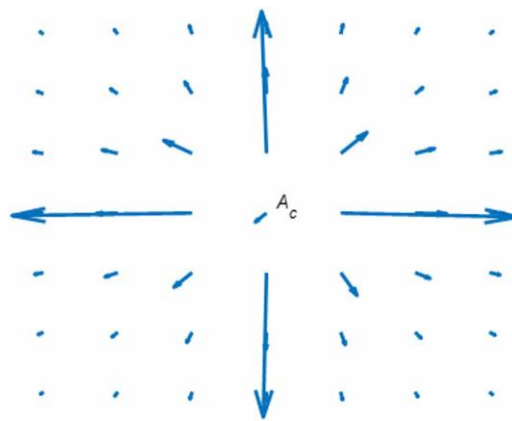


Рис.4.6. Відштовхувальне поле, що діє на агент A_c

Твердження 1. Закон, що регулює i -й агент, наведений таким виразом

$$u_i^g = u^i + u_i^{att} + u_i^{rep},$$

у якому u^i має значення лідерської дії в агрегації, компоненти u_i^{att}, u_i^{rep} є складовими притягувальних і відштовхувальних сил відповідно.

Доведення. Це впливає з обраної ідеї руху системи в потенціальному полі притягання і сил відштовхування. Вхідний контроль агента-лідера відрізняється від закону управління i -го агента, оскільки контроль над ним здійснюється за відношенням до лідера. Встановивши закон управління лідером, побудуємо траєкторію управління агрегацією відповідно до системи рівнянь

$$\dot{p}_1^l = p_2^l, \quad \dot{p}_2^l = k^l u^l. \quad (4.26)$$

Відповідно до (4.26) траєкторія лідера починається в момент $t = 0$ від точки $p(0)$ до точки $p(t_k)$. Далі розглянемо особливості руху агрегації на прямолінійних і криволінійних ділянках траєкторії.

4.3.1. Контроль на прямій частині траєкторії

Враховуючи припущення, що група рухається з приблизно однаковими швидкостями, тобто без прискорення, система рівнянь (4.26) перетворюється у форму

$$p_1^l = p_2^l = \text{const}. \quad (4.27)$$

Головним завданням агента під час руху в групі є збереження своєї позиції, уникаючи зіткнень із сусідніми агентами або перешкодами. Для цього пропонується такий закон контролю, який надає гладку функцію щодо позицій з двома сусідніми агентами

$$u^l = \begin{cases} -k_{p1}(p_{1i} - p_{1j}) - k_{p2}(p_{2i} - p_{2j}), & \text{if } i, j \text{ is member,} \\ 0, & \text{if } i \text{ is not member.} \end{cases} \quad (4.28)$$

У (4.28), $k > 0$ – позитивні коефіцієнти, які задають значення ненульових відхилень $\xi_{p1} \neq 0, \xi_{p2} \neq 0$ між позиціями сусідніх агентів $|p_{1i} - p_{1j}| \leq \xi_{p1}$ і $|p_{2i} - p_{2j}| \leq \xi_{p2}$. Припускаючи центральну позицію агента-лідера, його позиція визначається рівняннями

$$p^l = \frac{1}{N^*} \sum_{i=1}^{N^*} p_i, \dot{p}^l = \frac{1}{N^*} \sum_{i=1}^{N^*} \dot{p}_i, \quad (4.29)$$

де $N^* = N - 1$ – кількість сусідніх агентів у групі. Цей тип руху показано на рис. 4.7.

Твердження 1. Рух кожного агента групи, що складається з N агентів, описується системою диференціальних рівнянь другого порядку у вигляді

$$\dot{p}_1 = p_2, \dot{p}_2 = \bar{u} = -k_{p1}(p_{1i} - p_{1j}) - k_{p2}(p_{2i} - p_{2j}), \quad (4.30)$$

де $p = p_i - p_j$ – відповідні координати i -го й j -го агентів, причому $i \neq j, i \leq n, i, j \leq n$. Якщо $j = 1$, агент є лідером членів групи.

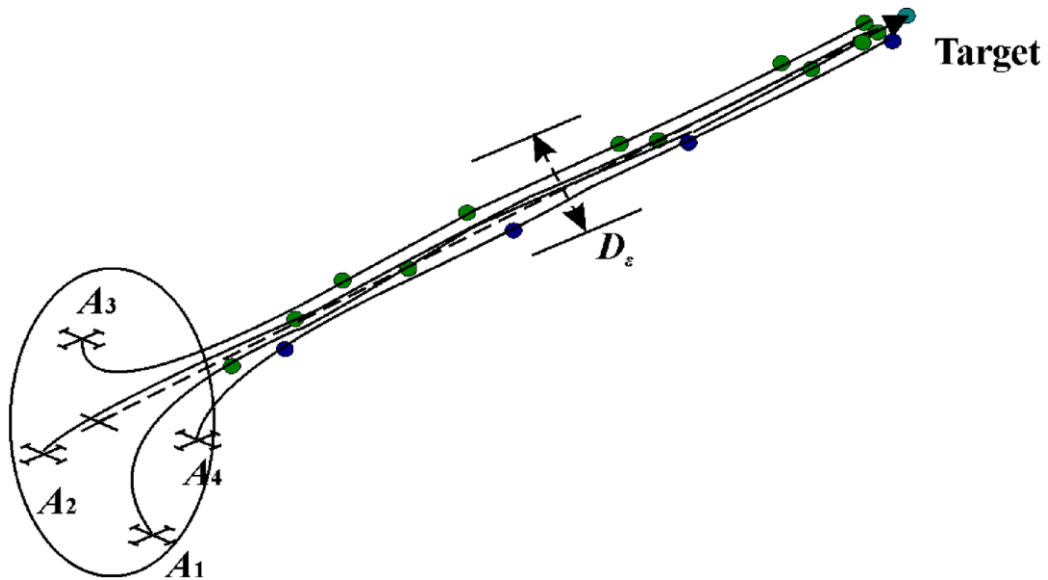


Рис.4.7. Рух БПЛА роїться вздовж лінії

Доведення. Це твердження випливає з (4.25), (4.27).

Наслідок 1. Динамічна система замкнутого циклу (4.30) сходиться до положення рівноваги

$$(p_{1i} - p_{1j}) \neq 0, (p_{2i} - p_{2j}) \neq 0. \quad (4.31)$$

Наслідок 2. Швидкість агентів-членів асимптотично сходиться до швидкості агента-лідера.

Наслідок 3. У системі (4.30) координати p_i при $p_i \neq p_j$ для інших $i \neq j, t \geq 0$.

Наслідок 4. Якщо $d = \|p_i - p_j\| < \varepsilon$ – максимальний розмір між БПЛА в групі, то розмір формування відповідає $D(p) < D_\varepsilon(p)$.

4.3.2. Рух на криволінійній частині траєкторії

У цьому разі система рівнянь (4.27) перетворюється в (4.26), агрегація рухається з прискоренням

$$\dot{p}_1 = p_2, \dot{p}_2 = \bar{u}. \quad (4.32)$$

У (4.32) керувальний сигнал набуває значення з умови $|\bar{u}| < U_{\max}$, розмір групи стає більшим, ніж на прямолінійній частині траєкторії, але умова цілісності групи (4.22) зберігається, як показано на рис. 4.8.

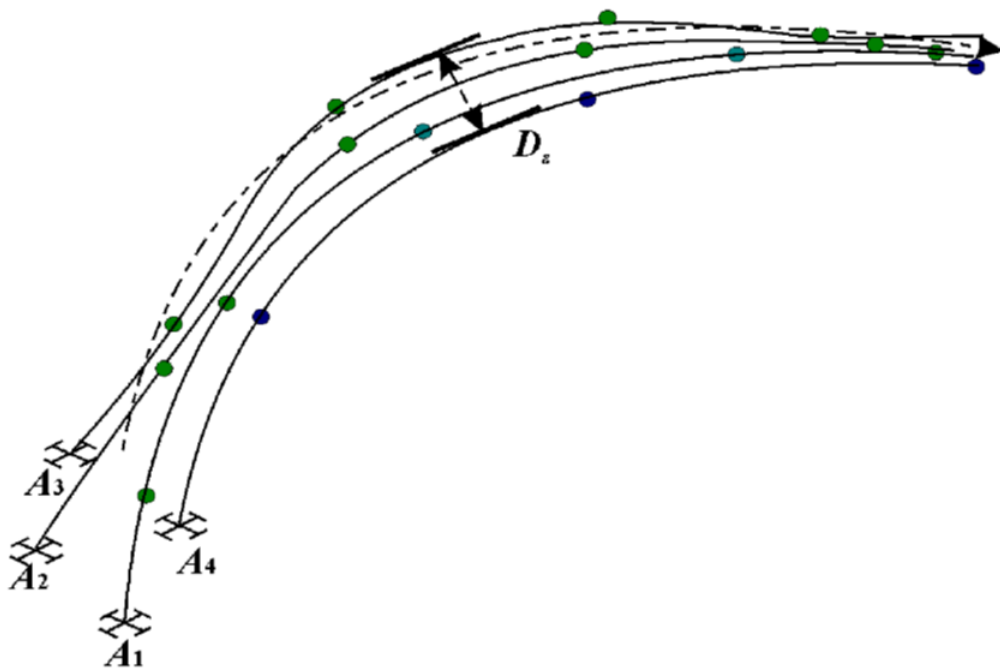


Рис. 4.8. Рух БПЛА по кривій

Твердження 2. Нехай задані коефіцієнти k_y і k_p такі, як $k_y > 0$, $k_p > 0$ відповідають істинній нерівності $0,5k_y/k_p < 0$, система (4.31) має експоненціальну стабільність.

Доведення. Наведемо систему диференціальних рівнянь (4.32) у вигляді диференціального рівняння

$$k_p \ddot{e}_p(t) + k_y \dot{e}_y(t) + k_{\dot{y}} e_{\dot{y}}(t) = 0, \quad (4.33)$$

де $e_p = p_i - p_j$, $e_y = y_i - y_j$, $e_{\dot{y}} = \dot{y}_i - \dot{y}_j$. Якщо $k_p \neq 0$ і $(k_p, k_y, k_{\dot{y}})$ є позитивними чинниками, це рівняння можна подати у вигляді

$$s^2(t) + k_y/k_p s(t) + k_{\dot{y}}/k_p = 0. \quad (4.34)$$

Тоді умова експоненціальної стійкості (4.31) залежить від негативної дійсної частини коренів (4.34), що задовольняється відношенням $k_y/(2k_p) < 0$.

Наслідок 1. Якщо $k_y = 0$, відбувається коливальний рух навколо лідера з постійною амплітудою і частотою, що дорівнює $\sqrt{k_{\dot{y}}/k_p}$.

Наслідок 2. Якщо $k_y/\sqrt{4k_{\dot{y}}k_p} > 0$, то утворюється асимптотичний стабільний рух.

Наслідок 3. Якщо $0 < k_y/\sqrt{4k_{\dot{y}}k_p} < 1$, то відбувається коливальний рух з помилкою, яка зменшується за амплітудою.

Наслідок 4. Якщо $k_y/\sqrt{4k_{\dot{y}}k_p} > 1$, то утворюється аперіодичний рух агента групи.

4.3.3. Особливості руху в умовах перешкод

Рух в умовах перешкоди є найскладнішим рухом [18], оскільки вимагає внесення до закону управління додаткових складових, заснованих на силах притягіння і відштовхування. Рух відбувається вздовж криволінійної частини траєкторії, тому для опису динаміки системи система рівнянь (4.32) із законом управління має вигляд

$$\begin{cases} u_{rep\ p_i} + u_{rep\ p_{1i}} + u_{rep\ p_{2i}}, \text{ if } (d - 2r) \leq d_0, p_{1i} > 0, p_{2i} > 0; \\ u_{rep\ p_i} + u_{rep\ p_{1i}}, \text{ if } (d - 2r) \leq d_0, p_{1i} > 0, p_{2i} \leq 0; \\ 0, \text{ if } (d - 2r) > d_0, \text{ or } p_{2i} \leq 0. \end{cases} \quad (4.35)$$

У системі рівнянь (4.35) використовуються

$$u_{rep\ p_i} = k_1 \left(\frac{1}{d-2r} - \frac{1}{d_0} \right), \quad (4.36)$$

$$u_{rep\ p_{1i}} = k_2 p_{1iobs}, \quad (4.37)$$

$$u_{rep\ p_{2i}} = k_3 p_{2iobs}, \quad (4.38)$$

значення r – максимальний геометричний розмір агента,

$$p_{1iobs} = p_{1i}^T n_{aobs} \quad (4.39)$$

і

$$p_{2iobs} = p_{2i}^T n_{aobs}, \quad (4.40)$$

де n_{aobs} – одиничний вектор, який вказує напрямок від i -го агента до перешкоди. Значення p_{1iobs} показує рух агента, якщо $p_{1iobs} > 0$, то агент рухається до перешкоди i , якщо $p_{1iobs} \leq 0$ рухається від перешкоди. Перший варіант подолання перешкод групою з чотирьох агентів наведено на рис. 4.9.

Оскільки перешкоди розташовуються так, що група здатна подолати цей тип перешкод тільки в разі зміни конфігурації. У цьому випадку відбувається переконфігурація з виконанням умови (4.29) для лідера агента.

Рух групи квадротронів, що рухається в потенціальному полі в напрямку до цілі за маршрутом, на якому є перешкоди, буде розглянуто нижче.

Припускаємо, що ця група складається з трьох агентів-членів і одного агента-лідера. Маршрут агентів має стартові позиції і кінцеву позицію:

$$p_{A1} = (100, 30, 0)^T, p_{A2} = (75, 20, 0)^T, p_{A3} = (130, 50, 0)^T, p_{A4l} = (110, 70, 0)^T, \\ p_t = (600, 270, 0)^T.$$

Координати розташованих фіксованих перешкод на маршруті відомі як $p_{01} = (270, 130)^T$, $p_{02} = (220, 210)^T$, і $D_\varepsilon(p_A) \leq 50$. Висота перешкод вище ніж

висота квадروتронів, що виконують маневр у горизонтальній площині. Висоту для розрахунків візьмемо $z = 10$. Переміщення агентів-членів і агента-лідера до цілі показано на рис 4.9.

Також показано, що група агентів обходить перешкоди і продовжує рух до цілі. Іноді під час подолання перешкоди група агентів може змінювати свій розмір формування і створена група агентів залишається без змін, якщо немає перешкоди на трасі.

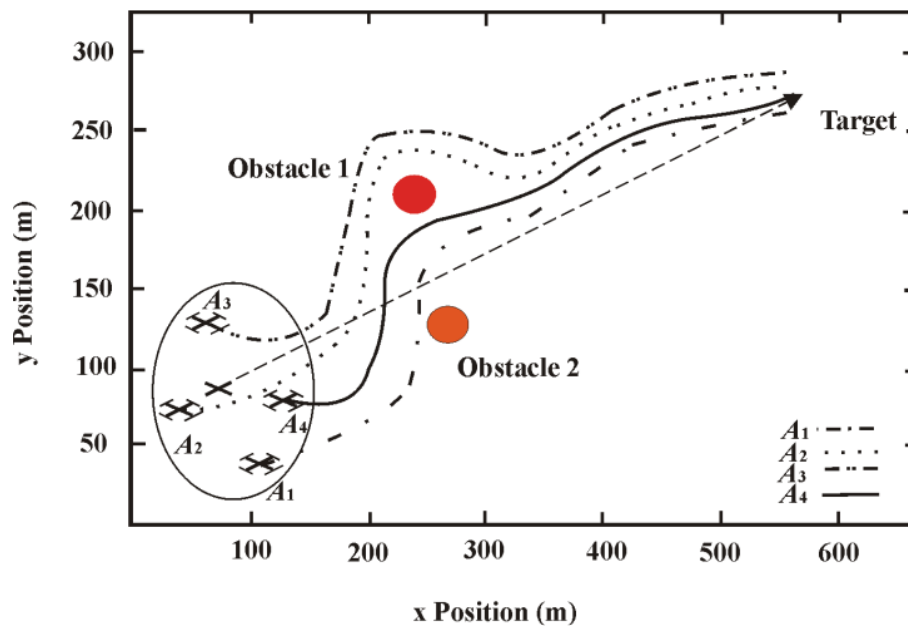


Рис. 4.9. Обхід руху агента-лідера і агента-члена до цілі

На рис. 4.10 подано реконфігурацію групи БПЛА, що рухається за типом лінії, якщо на пересіченій трасі розташовані сторонні перешкоди. У цьому разі тактика БПЛА схожа на колону $A_4 \rightarrow A_3 \rightarrow A_2 \rightarrow A_1$, де A_1 – перший, A_4 – останній.

У розділі запропоновано синтез закону керування рухом мультиагентної системи, щоб прослідкувати за маршрутом, на якому можливі перешкоди руху. Особливістю зазначеного підходу є синтезований закон управління з гладкою функцією часу. Два шляхи подолання перешкод, один з яких базується на обході, а також на реконфігурації. Закон контролю формує дві спеціальні потенціальні функції, одна з яких створює силу тяжіння агентів до центру структури, інша відштовхує агентів від сусідів і перешкод. Конфігурація польотної групи з погляду зору подолання перешкод пропонує відповідні зміни розміру і форми.

На основі запропонованого закону управління створений алгоритм, за яким було проведено моделювання мультиагентної системи.

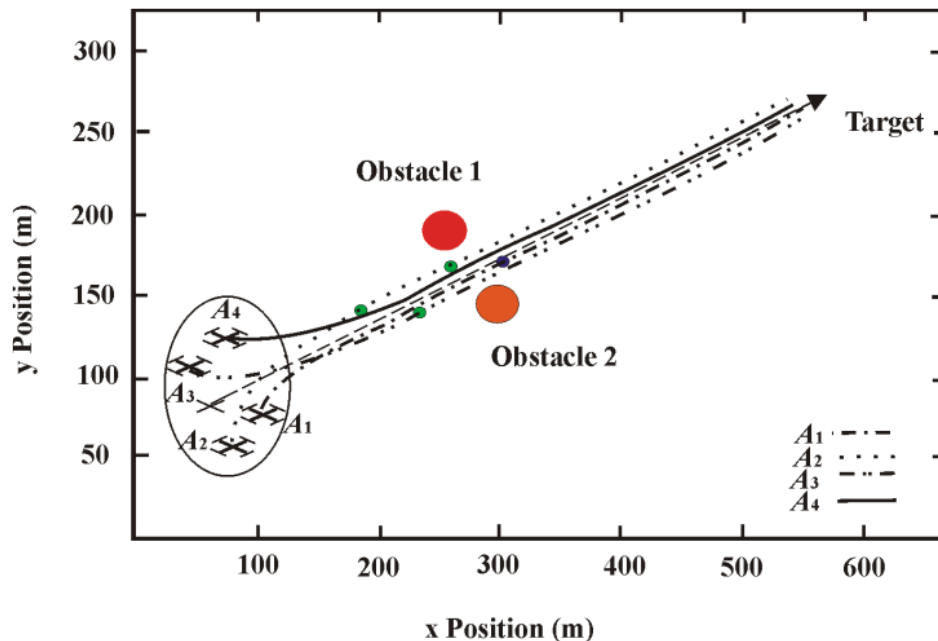


Рис. 4.10. Група БПЛА долає побічні перешкоди шляхом руху типу лінії

Приклади моделювання поведінки системи показують стійке переміщення агентів. Вивчення параметрів системи дозволяє забезпечити її стійкий рух і виявити відповідні параметри системи. Її поведінка охоплює такі етапи, як збір у групу, стеження за заданою траєкторією і уникнення перешкод. Дослідження показують, що успішне моделювання залежить від параметрів потенціальної функції μ та ν .

Зважаючи на те, що в умовах перешкод рух по кривій типовий, через що сигнал у каналах управління збільшується і перемикається на високій швидкості, що є так званим «ковзним режимом».

4.4. Груповий політ без лідера

Розглянемо основні принципи групових дій без лідера.

Кожен БПЛА вибирає порядок обльоту об'єктів відповідно до своєї нейромережевої структури, вид нейромережевої структури у обох БПЛА

однаковий, відмінність полягає в межах областей та відповідних їм альтернатив поведінки, що визначає загальну область відповідальності (рис. 4.11).

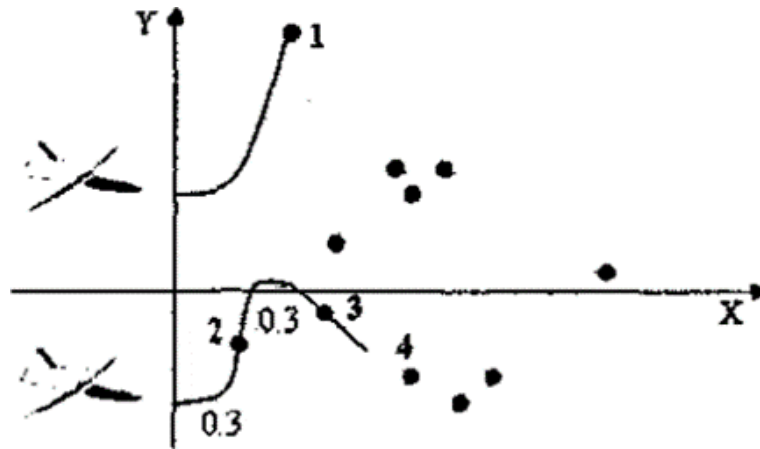


Рис. 4.11. Область відповідальності БПЛА

Інформація про об'єкти, що з'являються під час польоту, заноситься до спеціальних списків об'єктів кожного БПЛА.

Об'єкт, обраний одним БПЛА, вилучається зі списку об'єктів, що обслуговується іншим БПЛА, що забезпечується системою інформаційного обміну між ними.

Об'єкт, розташований у загальному полі відповідальності БПЛА, розглядається БПЛА у разі, якщо він ще не обслужений іншим БПЛА; не вибрано іншим БПЛА для обслуговування.

У разі відсутності об'єктів у межах області відповідальності БПЛА, ця сфера відповідальності розширюється до появи в ній хоча б одного об'єкта.

Алгоритм моделювання групового польоту, таким чином, складається з таких основних кроків:

1. Визначення наступної точки маршруту кожним із БПЛА окремо за допомогою відповідних їм нейромережових структур.

На початку моделювання вибирається один із БПЛА, якому віддається пріоритет у виборі першого об'єкта обслуговування. Вибраний об'єкт заноситься у так званий «список заборон», тобто вилучається із розгляду обома ЛА. Другий ЛА на підставі списку заборон визначає свій перший об'єкт для обслуговування:

2. Порівняння відповідних обраним об'єктам обслуговування довжин маршрутів обох БЛА, вибір коротшого.

Нехай, наприклад, довжина маршруту 1-го БПЛА становить 0,8, другого – 0,2. Той факт, що для першого БПЛА вона більша, ніж для другого, свідчить про те, що в момент безпосереднього обслуговування ним наступного об'єкта, другий БЛА встигне запланувати ще щонайменше один об'єкт для обслуговування, а значить, до списку заборон буде внесена корекція.

Приклад відображено на рис. 4.12. Видно, що на момент прибуття першого БПЛА в пункт 1, другий БПЛА вже обслужить об'єкти 2, 3 і вибере 4, вони вже будуть внесені до списку заборон.

3. Процедура вибору наступного об'єкта обслуговування здійснюється лише у тому БПЛА, поточна довжина маршруту якого менша. Водночас кожен новий вибраний об'єкт заноситься до списку заборон.

4. Повторюються пп. 2, 3 доти, доки БПЛА не опиняться в області кінцевої точки.

Блок-схема алгоритму показано на рис. 4.12, де $dist1$, $dist2$ – довжина маршруту ЛА з урахуванням обраного наступного об'єкта обслуговування першого та другого БПЛА відповідно. Процедура вибору наступної точки маршруту БПЛА – використання ним нейромережевої структури.

4.5 . Груповий політ з віртуальним лідером

Нині накопичений значний досвід зі створення безпілотних літальних апаратів, водночас питання їх ефективного застосування, з огляду на значну кількість публікацій у цьому напрямку у виданнях ближнього і далекого зарубіжжя (див., наприклад, [19–35] і посилання), залишається відкритим. Одним з найважливіших завдань забезпечення польотів є задача планування маршруту БПЛА. Це завдання полягає у визначенні набору точок у просторі, які б відповідали траєкторії польоту БПЛА і визначалися на карті. На вибір маршруту впливають такі чинники: обмежений час польоту; безпека польоту; множинність маршрутів.

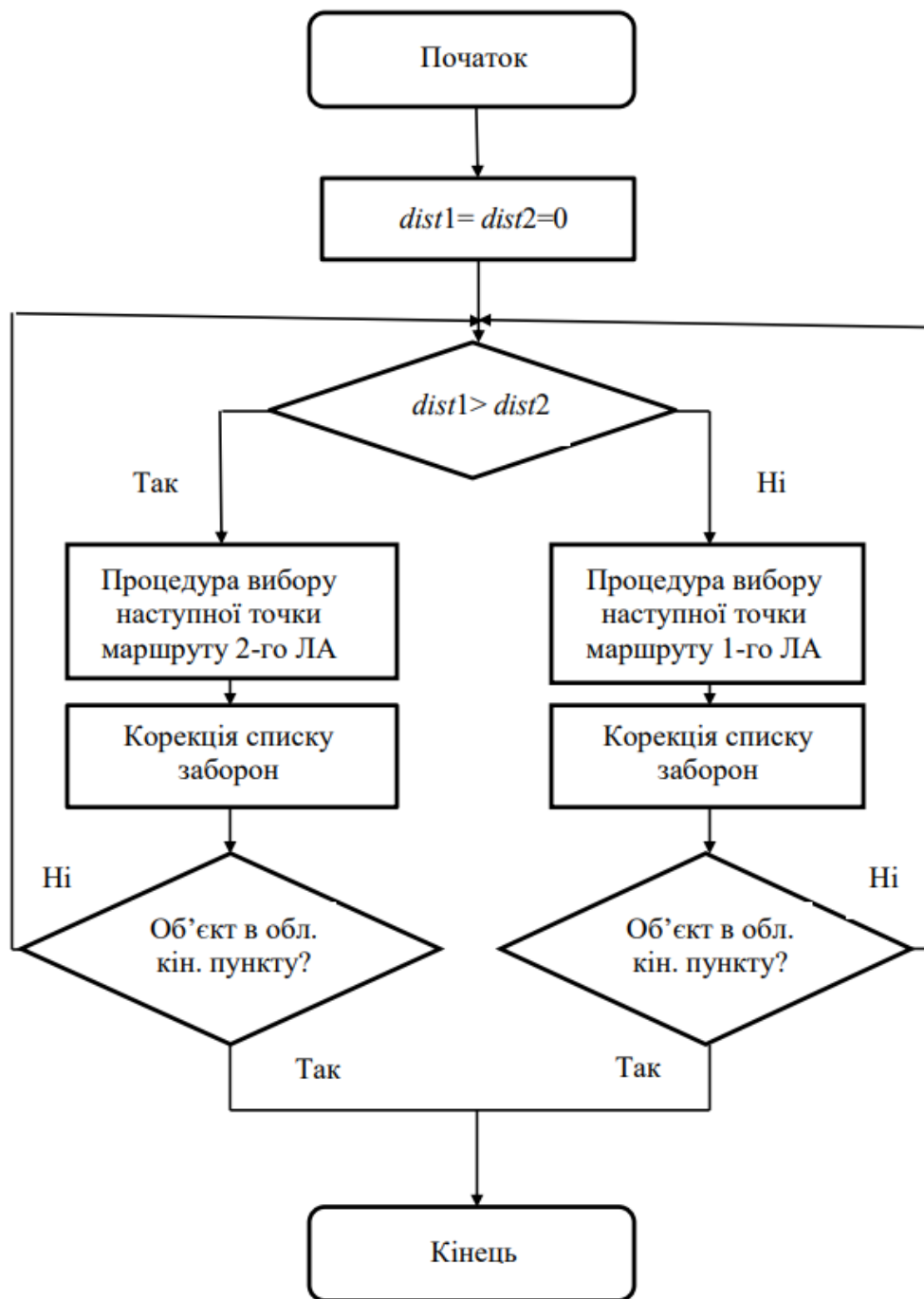


Рис. 4.12. Особливості алгоритму маршрутизації під час розроблення групових дій БПЛА

Останній чинник свідчить про неоднозначність шляху, за яким будуть слідувати БПЛА. Виконання цього завдання вимагає висування критерію, за яким слід вибрати найоптимальніший маршрут. В умовах перешкод під час польоту необхідно збільшувати число проміжних точок, які забезпечували б можливість

обходу можливих перешкод. У цьому разі виникає спільне завдання, як скорочення маршрутного часу, так і зменшення кількості точок за якими будується траєкторія.

Безпека польоту визначається вибором відповідних значень дистанції, інтервалу і перевищення у вертикальній площині між елементами групи. Це є самостійним завданням, заснованим на практиці застосування БПЛА і коректному виконанні маневрів під час виконання конкретних завдань.

Обмеженість польоту за часом передбачає визначення такого маршруту, який дав змогу би виконати поставлене завдання у встановлений час. З практичних міркувань маршрут БПЛА повинен складатися з прямолінійних ділянок і ділянок кривизни, що з'єднують прямолінійні ділянки.

У роботах [18–20] робилися спроби виконання завдання планування маршруту з використанням геометричного підходу. У роботі [21] робилась оптимізація спільного планування шляху для кількох БПЛА з обмеженнями зв'язку. Однак оптимальна траєкторія під час виконання завдання щодо Дубінсу може виявитися фізично не реалізованою, у такому разі маємо задачу з обмеженням на кривизну польоту або ж ці підходи в принципі не є застосовними в умовах великої кількості опорних точок, за якими будується маршрут. Для цього можуть виявитися придатними пошукові методи такі, як, наприклад, пошук на графах [22, 23] і мультиагентні алгоритми [24–26, 30], що інтенсивно розвиваються останнім часом. Однак алгоритми останнього типу мають проблемами збіжності та точності отриманого рішення.

Отже, метою вибору раціонального маршруту є розроблення підходу, що забезпечує побудову маршрутів групи БПЛА, які мали б мінімальну відстань між початковою і кінцевою опорними точками в умовах з великою кількістю проміжних точок.

4.5.1. Постановка завдання

Функціонування групи БПЛА ставиться у формі польотного завдання. У найзагальнішій формі система складається з оператора з пультом управління,

наземних засобів управління, контролю та зв'язку, групи з n БПЛА, $n \geq 2$. Передбачається, що БПЛА є різноцільовими і можуть багаторазово використовуватися (рис. 4.13). На рис. 4.13 введені позначення областей виконання завдання O_1 – O_4 окремими БПЛА, маршрути M_1 – M_4 , БПЛА – L_1 – L_5 .

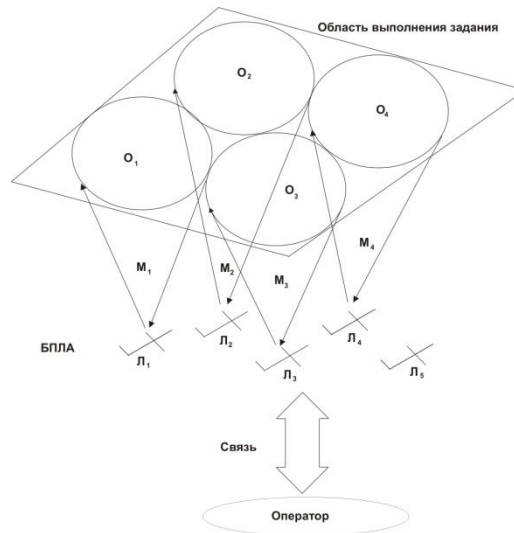


Рис. 4.13. Структура мультиагентної системи з БПЛА

Отримане завдання вводиться в обчислювальну частину, де воно піддається формалізації і обробленню планувальником. Планувальником визначається необхідна кількість БПЛА, яким призначаються маршрути, видаються завдання літакам, моніторинг виконання планів і виявлення розбіжності/невідповідності їх виконання. БПЛА отримують і відпрацьовують завдання, реагують на певні події і формують звіт про виконання завдання. Цей процес контролюється оператором, а саме: проводиться аналіз звітів, за потреби можуть вноситися корективи.

Маршрут задається набором, що містить N опорних точок, що визначаються просторовими координатами області виконання завдання. Передбачається, що значення початкової (x_0, y_0, z_0) і кінцевої змінних (x_k, y_k, z_k) фіксовані. Задані також координати перешкод, у вигляді координат (x_j, y_j, z_j) центру та його радіуса, $j = \overline{0, m}$. Необхідно побудувати таке рішення, яке дає змогу вибрати набір n опорних точок, таких, що $n < N$, забезпечує найменшу довжину шляху кожному літаку:

$$S = \min_{n < N} \sum_{i=1}^n S_i, \quad (4.41)$$

де $S = f(n, m, t)$, де t – тривалість алгоритму; m – відрізки шляху.

Завдання (4.41) визначає послідовність точок у просторі можливих рішень (граф), який забезпечує мінімальну відстань між початковою і кінцевою точками з урахуванням всіх можливих N . У роботі наведено можливі підходи до побудови оптимального маршруту за критерієм мінімуму довжини шляху, засновані на різних підходах.

4.5.2. Побудова дерева рішень

Природний шлях до виконання завдання (4.41) полягає в побудові дерева рішень та оптимізації маршруту за можливими напрямками. Дерево рішень структурно складається з внутрішніх і зовнішніх вузлів. У внутрішніх вузлах приймається рішення про наступний відвідуваний дочірній вузол за розрахунковими значеннями деякої функції рішення. Зовнішні вузли не містять дочірніх вузлів, описують значення, що характеризує вхідні дані.

Дерева рішень можуть будуватися у такий спосіб. У кореновому вузлі розраховується функція рішень за вхідними даними. Функція рішення становить довжину маршруту з урахуванням шляхових перешкод, що фіксуються на кожному черговому вузлі. За результатами розрахунку відбувається перехід до одного з дочірніх вузлів. Рішенням вважається лінія, що з'єднує точку S з точкою F (рис. 4.14).

За значної кількості точок n такий граф представляє набір рішень, структура якого вказує на дерево (ліс) рішень. Дерева рішень являють собою низхідну систему, основною метою якої є поділ дерева на взаємно непересічні підмножини. Процедура прийняття рішення про належність певного стану до того чи іншого класу за допомогою дерева рішень відноситься до методів класифікації станів.

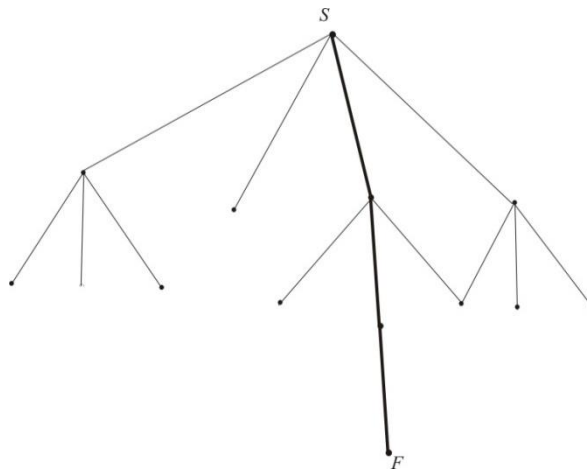


Рис. 4.14. Пошук рішень на дереві рішень

Відмінною особливістю такого графа є замкнутість, тобто кінцева точка збігається з початковою або достатньо близько до неї розташована, однак, $S \neq 0$, а ребра визначаються кривими другого порядку. Для спрощення побудови графа вважатимемо ребра прямими.

У разі використання алгоритму з пошуком в замкнутому графі (наприклад, Дейкстри [36]) вибір напрямку може бути зроблений за найбільшою відстанню, утвореною сусідніми трикутниками, що витікає з нерівності трикутника

$$c(i, j) \leq c(i, v) + c(v, j), \quad (3.42)$$

де i, j, v – опорні вузли дерева.

Такі переходи тривають доти, доки не буде «відвіданий» кінцевий вузол, що описує або мітку класу, або значення, пов'язане з вхідним вектором значень ознак. Наявність перешкод дає змогу додавати випередження шляхової точки, за якою напрямок подальшого маршруту проходження повинен бути змінений.

Алгоритм одноагентний, детермінований, однак вимагає щонайменше одноразового відвідування кожного вузла з метою визначення та фіксації надалі найменшої відстані. На відміну від мурашиного алгоритму збіжний.

Алгоритми, що належать до розряду алгоритмів пошуку на графі, допомагають знаходити маршрут з найменшою вартістю шляху від однієї вершини

до іншої. До алгоритмів такого виду можна віднести і алгоритми пошуку на дереві рішень, Дейкстри, A^* та їх модифікації. Час роботи алгоритмів загалом не перевищує $O(n^2)$, а для розрідженого графа $O((n + m) \log n)$, де n і m – кількість вершин і ребер графа відповідно.

Побудова багатоагентної системи з такими алгоритмами можлива в разі призначення агентам різних підзавдань з централізованим розподілом областей виконання завдання. Основними проблемними питаннями цих алгоритмів є вимоги до ресурсів пам'яті, що забезпечують зберігання експоненціального числа вузлів, та часові витрати на пошук усіх можливих рішень.

4.5.3. Мультиагентні алгоритми

Останнім часом багатьма авторами, що досліджують децентралізоване управління, пропагується підхід мультиагентних систем [20–30, 32], запозичений з громадських біосистем, до яких належать мурашник, бджолиний рій та ін. Ці системи привабливі за деякими ознаками, до яких відносять, насамперед, автономність дій окремих агентів, децентралізацію управління завдяки реалізації в системі колективного інтелекту і навченість агентів. Залежно від типу обраної мультиагентної системи накопичена під час пошуку інформація про пройдений маршрут передається у вигляді феромона для мурашок або ж виляючого танцю для бджіл. Як і в [20], як агенти будемо мати на увазі агентів, подібних мурашкам, що залишають феромон як одиницю інформативності.

Мурашиний алгоритм. У цій системі розглядається набір агентів $A_m = \{a_1, \dots, a_m\}$, що виконують єдине завдання – визначення найкращого маршруту шляхом багаторазового дослідження простору пошуку в різних напрямках. Особливістю передбачуваного переміщення є наявність феромона, що виділяється агентами на шляху в процесі свого переміщення. Вважається, що маршрут є кінцевим набором відрізків, що визначаються рядом опорних точок. Феромон, що залишається на відрізку ij маршруту, через деякий час випаровується. Запис ij означає, що здійснюється перехід з опорної точки i маршруту в точку j (рис. 4.15).

Отже, найкращим маршрутом є той, на якому залишається більша кількість феромона, оскільки додавання феромона відбувається частіше, ніж його випаровування. Тоді правило поновлення феромона записується у вигляді [20]

$$\tau_{ij}[k + 1] = (1 - p)\Delta\tau_{ij}[k] + \tau_{ij}[k] . \quad (4.43)$$

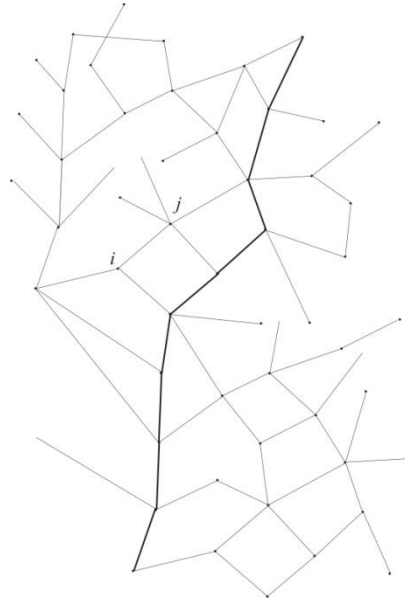


Рис. 4.15. Дія мурашиного алгоритму під час визначення маршруту

У рівнянні (4.43) $\tau_{ij}[k]$ – поточне значення феромона, що залишається на ділянці ij , $\Delta\tau_{ij}[k]$ має сенс кількості відкладеного феромона на відрізок ij визначеного маршруту черговим агентом на k -й ітерації з початковим значенням $\tau[0]$, а $p \leq 1$ – коефіцієнт випаровування феромона, який встановлюється інтенсивністю дії агентів, що обирається з інтервалу $p \in [0, 1]$.

Імовірність вибору транспортування агента з опорної точки i в точку j на k -й ітерації оцінюється формулою [24]

$$P_{ij}(k) = \frac{(\tau_{ij}[k])^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_l (\tau_{il}[k])^\alpha (\eta_{il})^\beta} , \quad (4.44)$$

де η – видимість наступної опорної точки, яка дорівнює величині зворотній віддалі до неї; α і β – вагові показники інтенсивності сліду феромона і видимості, що встановлюються на підставі проведених дослідів.

Перевагою підходу є можливість знаходження квазіоптимального маршруту, що досягається багаторазовим повторенням процедури проходження агентів за маршрутом, що відповідає максимальному значенню τ з (4.41). Тривалість процедури пошуку є «платою» за проведений пошук, що безпосередньо веде до пошуку стратегій удосконалення методу.

Як впливає з (4.42) (див. також [26]), кількість феромона є величиною ймовірнісною, тому для отримання достовірного результату необхідно велике число повторень експерименту, що значно збільшує час пошуку найкращого рішення. До того ж алгоритм не конвергентний, тобто після виявлення найближчого до кращого рішення генеруються нові рішення, що дає позитивну властивість – можливість уникнути попадання в локальні екстремуми. До недоліків методу слід також віднести евристичність підходу, а саме відсутність суворого математичного аналізу призводить до того, що всі рішення базуються тільки на результатах проведених експериментів.

Описаний підхід з агентами, що беруть участь у пошуку, має сенс у задачах зі значною кількістю невпорядкованих в просторі опорних точок, коли виникають певні труднощі під час пошуку найкращого маршруту. Слід припускати, що зважаючи на велике число агентів, задіяних у процедурі пошуку, в певних умовах можливо отримувати часовий виграш у використанні мурашиної колонії порівняно з іншими відомими підходами.

Цей підхід може бути також доцільний під час вибору найкоротшого маршруту з використанням БПЛА за наявності значної кількості перешкод на маршруті, що сприймаються як додаткові опорні точки.

У завданнях ж з малою кількістю опорних точок правильний вибір маршруту здебільшого очевидний і тому підхід мурашиної колонії не може бути рекомендований до застосування.

Алгоритм «запит-відповідь-угода». Іншим підходом до побудови децентралізованих систем, що використовують ройові рішення і оптимізацію на основі дерев рішень під час побудови систем з БПЛА, є підхід використання мультиагентних систем. У цьому разі система також становить набір агентів, що спілкуються між собою шляхом відправлення запитів, отримання відповіді і далі прийняття самостійного рішення на продовження пошуку, яке слід сприймати як двосторонню угоду. Такий підхід побудови мультиагентних систем отримав назву «запит-відповідь-угода».

У цьому разі кожен агент мультиагентної системи виконує своє автономне завдання, здатне виробляти не тільки обмін інформацією з центром, а й надавати допомогу своїм колегам. Відповідно до зазначених властивостей, кожному агенту БПЛА вказується свій специфічний маршрут, який не перетинається з маршрутом агента-колеги, але може доповнювати його. З огляду на призначення БПЛА, вважатимемо всі маршрути замкнутими. Варіанти маршрутів БПЛА можуть використовувати схеми, подані на рис. 4.16–4.18, де показано, що вони можуть координуватися також центром управління, наведеним на рисунках оператором.

З метою підвищення продуктивності функціонування системи, може бути призначено і більша кількість агентів на один маршрут, як це показано на рис. 4.16.

У системі управління з мультиагентним підходом використовується аналогія феромон – інформація, феромон випаровується – інформація застаріває. Наведені на рис. 4.16–4.18 можливі маршрути показують типові варіанти руху БПЛА на відкритих ділянках місцевості за замкнутими маршрутами в широких і вузьких кільцях, а також зигзагоподібний. Залежно від розміру області виконання завдання передбачається, що більша за величиною область відповідає маршруту з широким кільцем, а вузька – з малим.

З аналізу рис. 4.16–4.18 видно, що характерними елементами маршрутів є ділянки прямолінійного і кругового рухів БПЛА, що цілком реалізовується технічними засобами, хоча і може вимагати значних обчислювальних витрат з хорошою інформативністю каналу зв'язку.

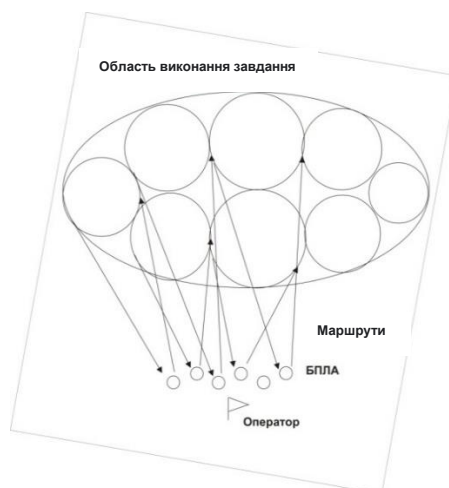


Рис. 4.16. Маршрути руху БПЛА в широкому кільці

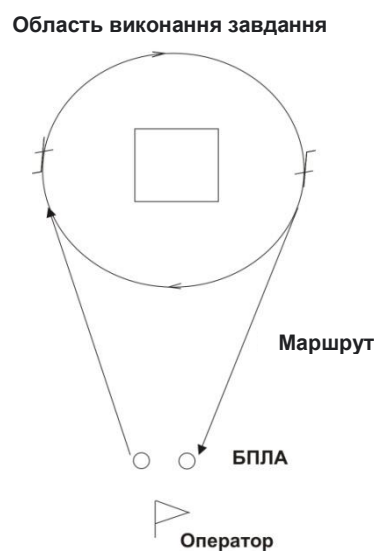


Рис. 4.17. Маршрут руху БПЛА у вузькому кільці

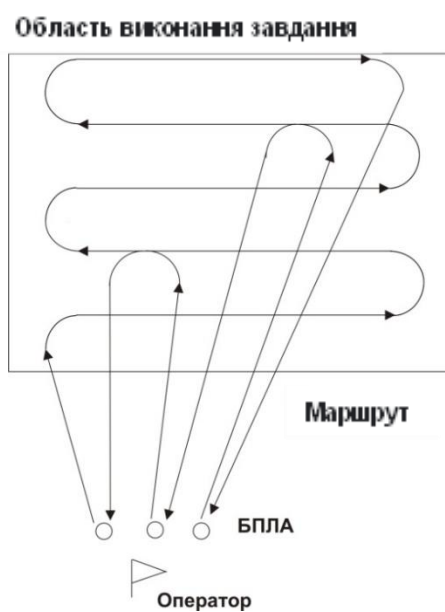


Рис. 4.18. Зигзагоподібні маршрути руху БПЛА

Програмний комплекс розроблення маршруту та польотного завдання для групи БПЛА наведено в додатку Д.

Порівняльне оцінювання різних підходів до побудови мультиагентних систем з БПЛА. Аналіз різних підходів до завдання планування маршрутів БПЛА в складних умовах дає змогу зробити висновок про доцільність її побудови як мультиагентної системи. Всі ці алгоритми базуються на різних системах знань. Так, мурашиний алгоритм вимагає інформацію про випаровування феромона, видимості (довжини) маршруту, набору агентів і за суттю імовірнісний.

Алгоритм пошуку рішень на графах детермінований, використовує інформацію тільки про опорні точки і відстані між ними, найкращий маршрут визначається одним агентом. Модель «запит-відповідь-угода» також відноситься до імовірнісних, як і мурашиний алгоритм. Алгоритми мурашиної колонії і принцип «запит-відповідь-угода» мають певні недоліки. Так, мурашиному алгоритму властиві ітераційність і багаторазовість повторення, що пов'язано з ймовірнісною природою алгоритму, що призводить до значних тимчасових витратах на пошук квазіоптимального рішення. Своєю чергою, підходу «запит-відповідь-угода» потрібно тільки попереднє визначення завдання (кінцева мета) і значний час на узгодження дій з сусідами.

Алгоритми пошуку рішень на графі є детермінованими алгоритмами, що добре сходяться, однак призначені для роботи з одним агентом. Узагальнені результати порівняльного оцінювання алгоритмів пошуку представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняльне оцінювання алгоритмів пошуку маршруту

Алгоритм	Пошук рішень на графі	Мурашиний	«Запит-відповідь-угода»
Основа	Детермінований	Імовірнісний	Імовірнісний
Збіжність	Експоненціальний	Поліноміальна	Поліноміальна
Агентність	Одноагентний	Мультиагентний	Число агентів визначається кількістю виконуваних завдань
Ресурси	Вимагає зберігання всієї карти вузлів	Не вимагає зберігання інформації про всі вузли	Не вимагає зберігання інформації про всі вузли
Інформування	Вихідні дані	Феромоном	Запит
Розмірність	Мала	Висока	Висока

У табл. 4.1 розмірність слід вибирати, керуючись висновками [24], де мала розмірність визначена як $n < 20$.

Реалізація завдання планування маршруту групи БПЛА. Визначення маршруту кожному елементу в групі з БПЛА в складних умовах функціонування є важливою і водночас тривалою процедурою, пов'язаною з множинністю вибору з можливих рішень. Природно виникає бажання застосувати централізоване управління, коли встановлюється маршрут за жорсткою схемою, що може призводити до невиправданої витрати ресурсів.

Аналіз можливих рішень цього завдання дає уявлення про способи побудови систем, що забезпечують розроблення плану маршрутів. Розглянуті способи базуються на одноагентному і мультиагентному підходах. Одноагентний, на відміну від мультиагентного підходу, має високу точність одержуваних рішень, хоча і поступається мультиагентному в швидкості збіжності в задачах з високою розмірністю і вимогах до пам'яті системи. Тому становить інтерес інтегрувати ці підходи і чекати від такої комбінації системного ефекту, забезпечуючи роботу мультиагентного підходу за високої розмірності системи, і в міру проходження опорних точок і, відповідно, скорочення розмірності системи передати подальший пошук оптимального рішення одноагентному алгоритму. Схематично таку інтеграцію можна подати у вигляді схеми рис. 4.19.

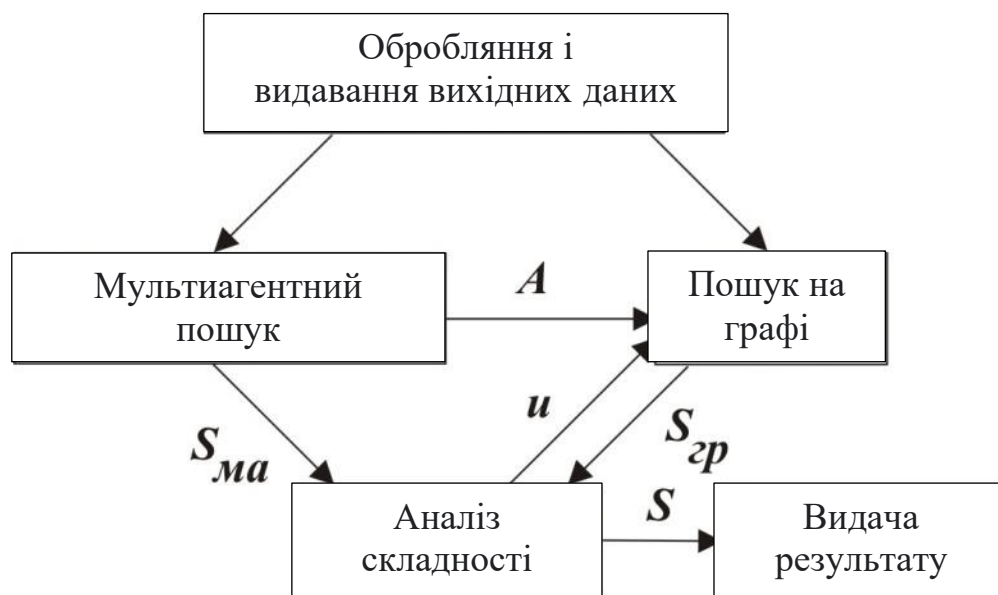


Рис. 4.19. Схема інтеграції алгоритмів

На рис. 4.19 алгоритми мультиагентного пошуку і пошуку на графі працюють паралельно і видають результати пошуку на блок аналізу складності системи. Блок аналізу складності виробляє оцінку складності завдання шляхом зворотного відліку необроблених результатів. Приймається рішення про доцільність видавання як результати S_{ma} системи мультиагентного пошуку або S_{gp} пошуку на графі, у разі визначення кращих результатів пошуку. Сигнал u , який видається в блок пошуку на графі, свідчить про пріоритетність результатів цього блока. Після закінчення процесу як результат видається найкращий маршрут.

Ця інтеграція дає змогу отримати рішення значно точніше і швидше, ніж окреме використання алгоритму рішення на графах або ж мультиагентного. Особливістю підходу є паралельне використання алгоритмів, що забезпечує високу швидкість збіжності та достатню точність результату завдяки використанню точного методу, яким є пошук на графі. У разі, коли аналізатор складності завдання виявляє можливість використання пошуку на графі, видається сигнал u , що забезпечує перезавантаження вихідних даних A з мультиагентного алгоритму на графовий. Такий перехід з одного алгоритму на інший допомагає реалізувати ідею адаптації до складності завдання. Повний маршрут формується в блоці аналізу складності завдання. Цей підхід загалом дає можливість ефективно виконувати складні практичні завдання планування маршрутів БПЛА.

У розділі розглядається завдання вибору маршруту в разі колективного використання БПЛА, а також наводиться порівняльний аналіз алгоритмів, заснованих на різних системах знань, а саме алгоритмів, що застосовуються в мультиагентних системах, і алгоритмів пошуку на графах. Серед мультиагентних – розглянуті мурашиний алгоритм і алгоритм «запит-відповідь-угода». Альтернативою мультиагентним системам показано також виконання цього завдання детермінованим алгоритмом, що використовує підхід пошуку рішень на графі, що має гарні властивості збіжності та точності у визначенні результату.

Найкращого виконання завдання вибору маршруту в системах високої розмірності, як показано в роботі, слід очікувати в комбінуванні розглянутих алгоритмів, коли недоліки тривалості пошуку і точності мультиагентних підходів

компенсуватимуться збіжністю і точністю графових алгоритмів пошуку рішень, що дасть змогу реалізувати тріаду «інтелект-адаптація-управління» в досягненні властивості емерджентності розроблюваних систем.

4.5.4. Реконфігурація мультиагентних систем в умовах завад

Останнім часом отримали поширення мультиагентні системи, які являють собою сукупність взаємозв'язаних агентів, що виконують певне завдання. Цей факт підтверджується бурхливим збільшенням публікацій у згаданому напрямку, кількістю наукових досліджень, відомостей про технічні новини [37–43]. Агентами можуть бути люди, апаратні та програмні засоби, але незважаючи на подання дій, їх взаємодія в межах системи може бути реалізована за однаковими принципами. Серед агентів у системі може бути задіяна ієрархія, якщо буде визначений агент-лідер або менеджер, з яким інші члени команди обмінюються повідомленнями або звітами. Структурно мультиагентна система має ієрархічну чи мережеву конфігурацію, що складається з вузлів, роль яких виконують агенти чи менеджер, та зв'язки між ними.

Мережева структура системи має перевагу над ієрархічною за часом обміну інформацією, але є надзвичайно складною в разі збільшення кількості вузлів. Під час побудови мультиагентних систем може бути корисним досвід телефонних, комп'ютерних, транспортних мереж, нафтогазової системи [44, 45]. У військовій галузі мультиагентні системи вже використовуються для проведення розвідки, моніторингу, нанесення масованого удару, прихованого знищення об'єктів, нанесення втрат противнику, виведення з ладу озброєння і військової техніки, порушення роботи інформаційних систем та ін. [38–40].

Досвід останніх локальних конфліктів свідчить, що найпоширенішими апаратними мультиагентними системами є безпілотні летальні апарати, які використовуються під час підготовки та виконанні бойових операцій [37, 38, 46, 47]. Наприклад, розроблення БПЛА «Орлан-10» передбачає групу 4–6 апаратів, що передають інформацію один-одному і далі на пункт керування. Їх використання

стає ефективним під час дослідження територій великого розміру або застосування завад. Можливе також використання ешелонованої за висотою групи, координатором якої виступає супутник-ретранслятор. Відомим є також використання надмалих літальних апаратів-носіїв бойового заряду невеликої маси, які швидко збираючись в одному місці, здатні нанести великих втрат унаслідок сумарного тротилового еквівалента вибухової речовини. Перспективним напрямом застосування групи БПЛА є постановка активних та пасивних завад радіоелектронним засобам різного типу. В роботі проаналізовано поведінку мультиагентної системи в умовах завад.

Мультиагентні системи діють у навколишньому середовищі шляхом виконання певних рухів. Водночас першочерговим завданням стає безпека дій у групі. Зазвичай це завдання виконується шляхом витримки дистанцій та інтервалів в умовах руху та забезпечення взаємодії за умови виходу з ладу окремих апаратів. Наявність великої кількості апаратів та помилок керування значно ускладнює цей процес. Тому значна увага різними авторами приділяється саме цьому питанню.

Так, принципи динамічної децентралізованої взаємодії агентів на основі погодженості рівнів функціонування (SLA, service level agreement) у мультиагентній системі надані в [41]. Агенти не піддаються зовнішнім діям, але передбачається безперервна їх самоорганізація за часом. Динамічна взаємодія базується на клонуванні, розподілі ресурсів та адаптації зв'язку. Децентралізація не вилучає центрального агента, який взаємодіє з кожним та через якого здійснюється виконання завдань, але самостійно він не виконує жодного. Така система здатна обслуговувати декілька користувачів, тому нагадує звичайну мережу.

У праці [43] сформульовано підхід до контролю формування рою безпілотних літальних апаратів (роботів) для відстеження рухомої цілі в динамічному середовищі на основі методу створення штучного притягувального потенціального поля в поєднанні з контролером стану зворотного зв'язку. За такого підходу, між лідером і ціллю генерується потенціальне поле, на підставі якого фіксуються відносні положення елементів системи з лідером та здійснюється

відстеження цілі. Інші роботи в рої контролюються притягувальним потенціальним полем, що дає змогу їм слідувати за лідером. Під впливом потенціального поля виконується організація побудови спільних дій сусідніх роботів, між якими зіткнення відсутні. Уникнення перешкод відбувається завдяки відштовхуванню в потенціальному полі, створеному в місці навколо перешкоди.

Методику визначення оптимальної організації в групі на основі наявних моделей побудови за допомогою теорії графів запропоновано в [46]. Розроблений підхід дає змогу визначити оптимальну побудову групи залежно від інтенсивності обміну інформацією.

Альтернативний шлях щодо прокладання маршруту до цілі, що розглядається в [47], оснований на геометричному поданні маршруту в просторі. Маршрут задається точками, з'єднаними між собою в просторі. З'єднання відбувається прямими лініями та арочними кривими, що породжує множинність вибору маршруту. Оптимальність маршруту досягається введенням обмеження на кривизну траєкторії, яка повинна задаватися відсутністю перетину кривих рівної відстані і мінімальністю відстані між окремими точками.

У праці [33] проаналізовані підходи до організації обміном інформації між окремими елементами групи на основі пакетного підходу передавання інформації. Встановлено, що кращі показники мають протоколи, у яких забезпечується передавання пакету даних обмеженого розміру з відповідним контролем.

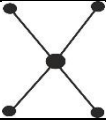
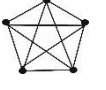
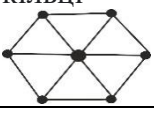
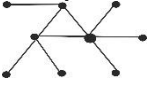
Самоорганізація мультиагентних систем у реальних умовах приводить до змін у конфігурації системи, що зв'язані з виходом з ладу її елементів. Такі підходи розглядаються в роботах [48, 49] на прикладі мобільних систем зв'язку. Як показники ефективності таких систем висувуються показники надійності, що може бути виправдано в окремих випадках. На жаль, єдиного підходу до аналізу мультиагентних систем наразі не розроблено. Тому, метою цього дослідження є оцінювання показників ефективності мультиагентної системи, що являє собою групу БПЛА, які діють в умовах штучних та природних завад, що приводить до зміни конфігурації системи з позиції теорії систем масового обслуговування.

Постановка проблеми. Уявімо мультиагентну систему інформаційною мережею з двонапрямленими зв'язками між її елементами (вузлами). Вузли мережі здатні приймати, перетворювати, передавати інформацію та обмінюватися певними даними, дозволяється зміна конфігурації системи. За способом управління мережа відповідає архітектурі «клієнт-сервер». Організація зв'язку між вузлами в мережі визначається топологією комп'ютерної мережі або конфігурацією графа. Залежно від типу з'єднань вузлів розрізняють топології: шина, кільце, зірка, коміркова та їх комбінації. Необхідність вибору топології мережі зумовлена низкою чинників, визначальними серед них є відстань, безпека, надійність, вартість мережі та деякі інші, які слід розглядати в кожному окремому випадку розроблення системи. Відомі топології комп'ютерних мереж наведені в табл. 4.2.

Аналіз комп'ютерних мереж за [45, 46] та їх можливостей відповідно табл. 4.2 вказує на рідке використання класичного варіанта топології такої, як «шина», «кільце» та «зірка». Найчастіше застосовуються гібридні топології. Важливість їх викликана розвитком обладнання для створення локальних мереж. Ці топології мають кращі показники надійності та масштабованості, але потребують розподілу трафіку та, відповідно, додаткового обладнання. Для тих мереж, де є необхідність обміну великими потоками даних, як-от потоки цифрових зображень, завантаження файлів, застосування додаткових засобів безпеки, пропускна здатність мережі значно знижується.

Таблиця 4.2 – Типи топологій

Мережа	Розгортання	Надійність	Доставлення пакетів	Схема доступу
	Просте, шляхом під'єднання до загальної шини, але не більше ніж 10 вузлів	Дефекти в кабельній магістралі виводять із ладу всю мережу	До кожного комп'ютера мережі пакети надходять одночасно	Конкурентна
	Мінімум апаратного забезпечення, просте налаштування та розгортання	Відмова вузла призводить до відмови мережі	Однакові можливості щодо отримання пакетів	Маркерна («token»)
	Просте масштабування, необхідність концентратора	Критичний елемент – концентратор	Одне посилання тільки одному комп'ютеру, можливі затримки	Адресна

Мережа	Розгортання	Надійність	Доставлення пакетів	Схема доступу
				
Коміркова 	Необхідність забезпечення взаємодії з сусідніми вузлами	Втрата однієї лінії зв'язку не впливає на роботу мережі	Пакети надходять адресно	Адресна
Шина-зірка 	Потребує додаткового обладнання	Втрата працездатності фрагменту не впливає на всю мережу	Проблеми розподілу трафіку	Конкурентність по шині, адресність по зірці
Зірка на кільці 	Необхідність додаткового обладнання	Залежність від концентратора, що керує кільцем	Проблеми розподілу трафіку	Однаковий доступ завдяки маркерам
Гібридна коміркова 	Потребує додаткового обладнання	Менша надійність ніж чисто коміркової	Проблеми розподілу трафіку	Необхідність адресації

Основною ознакою мультиагентності системи є кількість агентів, що утворюють систему. Їх традиційно більше трьох, вони здатні спільно діяти під час виконання певних завдань, взаємодія організовується шляхом обміну повідомленнями. Отже, опис мультиагентної системи повинен містити переліки агентів A_i та завдань W_j , набір повідомлень M_k , спосіб обміну повідомленнями (наприклад, синхронний чи асинхронний). Наприклад,

$$(A_i : i = 5; W_j : j = 1 \dots n; M_k : k = 1 \dots m; Async). \quad (4.45)$$

Запис (4.45) означає, що мультиагентна система складається з п'яти агентів, здатних виконувати n типів діяльності, обмін повідомленнями – асинхронний. Агент у системі характеризується станом, який може бути вільним, зайнятим, активним чи пасивним.

Ставиться завдання визначити можливості ефективної дії агентів системи в умовах впливу природних чи штучних перешкод на систему (4.45).

Обмін інформацією. Передавання інформації в мультиагентних системах відбувається згідно з правилами, що регламентуються відповідними протоколами. Ними встановлюються адреса, розмір і структура пакету, що передається, швидкість передавання даних.

Адреса може бути індивідуальною, коли повідомлення посилається тільки одному агенту, груповою, коли повідомлення розсилається кожному агенту в групі, або деякій підгрупі агентів. Такий спосіб адресації подібний до адресації в комп'ютерних мережах. Передавання даних відбувається від адреси джерела до адреси приймача.

Якщо група агентів значна, тоді виникає необхідність передавати інформацію через транзитні вузли. Але водночас виникає потреба прокладання маршруту щодо забезпечення мінімуму часу на доставлення інформації, що досягається мінімумом транзитних вузлів або наявністю каналів з високою пропускну здатністю та надійністю ліній зв'язку. Зрозуміло, що невелике збільшення кількості транзитних вузлів, що мають велику пропускну здатність, переважне над мінімальною кількістю вузлів з невеликою пропускну здатністю з погляду часу передавання інформації. Надійні канали зв'язку характеризуються мінімальними втратами інформації, що передається.

Через вузол може проходити декілька підпотоків, їх відрізняють за адресою пункту призначення. Зрозуміло, щоб визначити маршрут, який би забезпечив однаковий час потоків різного обсягу даних, необхідно брати до уваги швидкість передавання, яку мають окремі лінії, та надавати можливість проведення розпаралелювання підпотоків та їх збирання. Перемикання вузлів для передавання підпотоків здійснюється за допомогою мультиплексування вільних каналів.

Задача маршрутизації. Ця задача полягає у визначенні маршруту проходження інформації кінцевому агенту. Маршрути можуть бути статичними або динамічними. Статичний маршрут задається одноразово або за певним розкладом та не змінюється в межах певного часу дії інформаційної системи. Динамічні маршрути обчислюються відповідними алгоритмами залежно від топології та стану інформаційної мережі. До них належать алгоритми пошуку

найкоротшої відстані в ширину, Дейкстри, Беллмана-Форда, Флойда-Воршалла [50, 51].

Пошук в ширину. Нехай заданий граф $G = (W, E)$, у якому визначені стартова s і кінцева k вершини. Здійснюється обхід кожної вершини $w_j \in W$ графа G , запам'ятовується кількість пройдених ребер (дуг) $e_i \in E$, $i = 1 \dots N$, $j = 1 \dots M$. Мінімальна відстань $L(s, k)$ між точками s та k відповідає найменшій кількості ребер, що з'єднують вершини s і k

$$L(s, k) = \min_{e \in E} \sum_{i=1}^N e_i, \quad (4.46)$$

де N – кількість дуг у графі. Приклад застосування алгоритму наведено на рис. 4.20. Найкоротший маршрут передавання інформації між вершинами 1–9 за алгоритмом (4.46) відповідно до рис. 4.20 становить $L(1, 9) = 3$.

Алгоритм однаково працює з орієнтованими та неорієнтованими графами. Оцінкою продуктивності графа виступає часова складність $O(\cdot)$, що визначається кількістю операцій за алгоритмом (3.65).

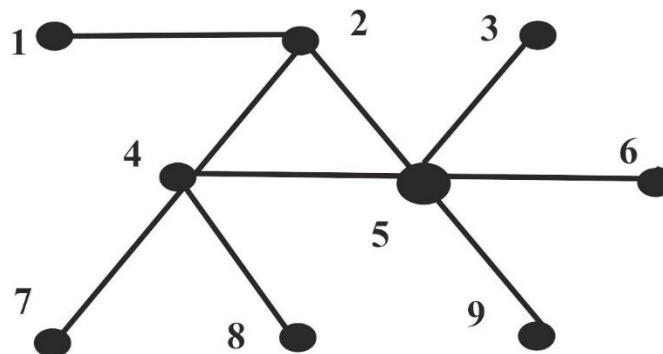


Рис. 4.20. Мультиагентна система, що складається з дев'яти агентів

За цим алгоритмом усі вузли та ребра скануються одноразово, тому часова складність визначається їх кількістю, а саме $O(M+N)$.

Алгоритм Дейкстри. Цей алгоритм є процедурою пошуку найкоротшого шляху на зваженому орієнтованому графі. Алгоритм використовується протоколами маршрутизації OSPF та IS-IS в IP-мережах [44, 52]. Відповідно до

цього алгоритму будується орієнтоване дерево з наявних вершин $y \leq N$ графа, починаючи з вершини $s = 1$, де N – загальна кількість вершин, будується дерево D . Ребра графа мають вагу $\omega(i, j)$ таку, що

$$\omega(i, j) = \begin{cases} 0, \text{ якщо } i = j, \text{ тобто та сама вершина,} \\ \omega > 0, \text{ якщо } i \text{ та } j \text{ сусідні вершини,} \\ \infty, \text{ якщо інакше.} \end{cases} \quad (4.47)$$

Довжина шляху на кожному кроці k від вершини s визначається правилом

$$L(k) = \min_y [L(y) + \omega(y, k)] \text{ для } y \notin D, L(s) = 0. \quad (4.48)$$

Правило (4.48) не дозволяє робити проходи по гілках дерева D з великою вагою. Отже, множина вершин y створюваному дереві шляхів D являє собою впорядковану послідовність зв'язаних між собою вузлів, яка містить найкоротший шлях від вершини x до k . Цей шлях показаний на рис. 4.21 стрілками.

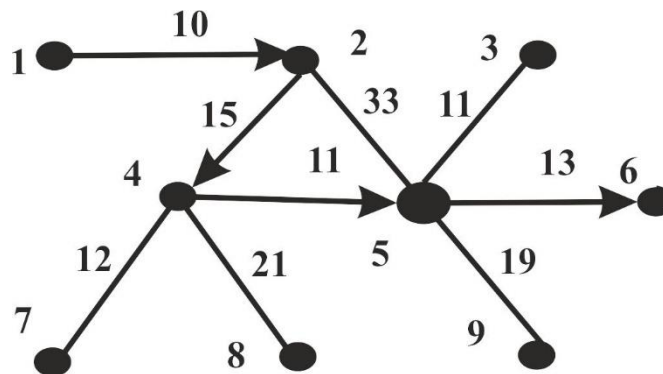


Рис. 4.21. Мультиагентна система зі зваженою структурою графа

Оскільки алгоритм ітераційний, то число ітерацій визначається кількістю вершин графа, тому часова складність алгоритму $O(N)$. У межах кожної ітерації відбувається нове проходження з врахуванням нової $(y+1)$ вершини. Водночас вершини з найбільшою вагою вивільняються, а довжина шляху з новими вершинами поновлюється, кращий результат запам'ятовується. Це також

оцінюється кількістю вершин. Загальна продуктивність алгоритму оцінюється величиною $O(N^2)$. Отже, алгоритм Дейкстри ресурсоемний, але завдяки знанням топології мережі і шляху до потрібної вершини, маршрутизатор завжди знаходить альтернативний шлях до потрібного вузла мережі у разі виникнення проблем у будь-якому вузлі визначеного шляху.

Алгоритм Беллмана-Форда. За суттю цей алгоритм нагадує попередній (Дейкстри). На відміну від алгоритму Дейкстри цей алгоритм не відкидає ребра з великою вагою та ітераційно розраховує довжину усіх шляхів у графі, запам'ятовуючи мінімальний шлях. Кількість ітерацій, як і в алгоритмі Дейкстри визначається кількістю вершин, а кількість розрахунків у межах ітерації кількістю ребр, то часова складність алгоритму оцінюється величиною $O(V \cdot E)$. Результат цього алгоритму для графа рис. 4.21 збігається з алгоритмом Дейкстри. За однакових розмірів графа алгоритм Дейкстри менш ресурсоемний ніж Беллмана-Форда, а значить швидший. Зменшення ресурсоемності можна досягти зменшенням кількості ребер, тобто переходом до розрідженого графа.

Алгоритм Флойда-Варшалла. Основою цього алгоритму є метод динамічного програмування, відповідно до якого ділянка найкоротшого шляху є теж найкоротшим шляхом. Отже, якщо знайдені усі проміжні ділянки (вузлові точки) найкоротшого шляху, то це свідчить про те, що й найкоротший шлях знайдений.

Нехай відома матриця ваг графа w_{ij} , тоді найкоротший шлях з вершини i у вершину j знаходиться за процедурою

$$l_{ij}^k = \begin{cases} \omega_{ij}, & \text{якщо } k = 0, \\ \min_k(l_{ij}^{k-1}, l_{ik}^{k-1}, l_{kj}^{k-1}), & \text{якщо } k \geq 1, \end{cases} \quad (4.49)$$

де $k \in \{1, 2, \dots, k\}$ – множина проміжних точок графа. Складена у такий спосіб матриця L розміру $n \times n$ дає відповіді про всі пари $i, j \in V$. Оптимальний шлях для графа рис. 4.21 показаний в матриці 9×9 сірим кольором (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Матриця пошуку за алгоритмом Флойда-Варшалла

Цей алгоритм матричного типу, передбачає додатковий пошук k проміжних вершин, тому обчислювальна складність не перевищує $O(N^3)$. Доцільність застосування алгоритму визначається необхідністю виявлення найкоротшого шляху між всіма парами вершин графа.

Зміна структури системи. Основною властивістю мультиагентної системи є те, що вона в процесі виконання завдань може змінювати свою структуру. Ці зміни можуть бути викликані не тільки результатами внутрішніх рішень щодо виконання завдань, але й діями зовнішніх чинників. Структура системи може змінюватися за результатами виходу з ладу каналу зв'язку чи окремого елемента. В наслідок цього зменшується розмір системи. Розмір може відновлюватися та навіть збільшуватися завдяки під'єднанню до системи нових елементів. Тобто розмір системи є її показником. Реакцією на зовнішні події є зміна топології системи. Кільце може стати шиною або зіркою під час визначення вузла, який виконуватиме роль координатора системи.

Під реконфігурацією мультиагентної системи розумітимемо зміну побудови системи, яка стосується розміру чи її топології. Особливістю реконфігурації є перебудова структури та топології системи з метою унеможливлення збоїв у роботі системи. Приклад реконфігурованої системи показано на рис.4.22.

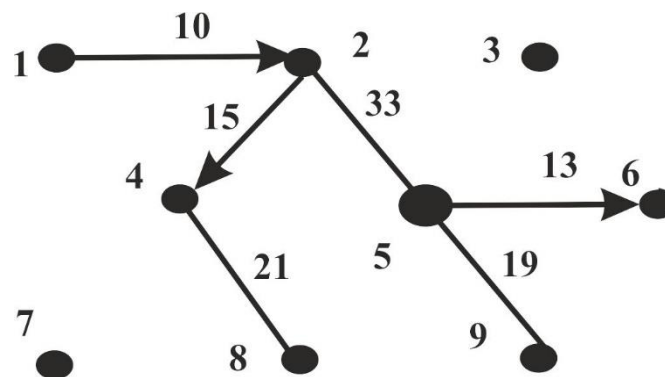


Рис. 4.22. Зміна будови мультиагентної системи унаслідок втрати зв'язку

Для оцінювання ефективності системи вводяться коефіцієнти розміру системи K_{Σ} , ступінь виконання завдання $C_{\text{вик}}$ та швидкість реконфігурації $v_{\text{рек}}$.

Коефіцієнтом розміру системи K_{Σ} будемо називати відношення діючої кількості елементів системи $K_{\text{д}}$ до її початкової кількості $K_{\text{поч}}$

$$K_{\Sigma} = \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{поч}}}. \quad (4.50)$$

Беручи до уваги попередні зауваження щодо роботи системи з (4.50) випливає, що $K_{\Sigma} \geq 0$. В нормальному режимі функціонування системи цей коефіцієнт дорівнюється 1, якщо $K_{\Sigma}=0$, то система не працює, за умови реконфігурації він набуває значення $K_{\Sigma} \in [0, 1]$, якщо $K_{\Sigma} > 1$, то відбувається нарощування системи.

Ступінь виконання завдання мультиагентної системи $N_{\text{вик}}$ можна кількісно оцінити звітністю елементів системи перед координатором або оператором системи, водночас кількість звітів $N_{\text{зв}}$ дорівнюється або перевищує кількість поставлених завдань $N_{\text{зав}}$

$$N_{\text{вик}} = \frac{N_{\text{зв}}}{N_{\text{зав}}}. \quad (4.51)$$

У разі не виконання завдання $N_{\text{вик}} < 1$, для виконаного повністю завдання $N_{\text{вик}} \geq 2$. Мінімальне значення означає, що система сформувала щонайменше два звіти: про прийняття щодо його виконання та доповідь про його виконання.

Швидкість реконфігурації $v_{\text{рек}}$ повинна перевищувати швидкість виявлення збоїв у системі, тобто

$$v_{\text{рек}} \geq (2..5)N_{\text{зб}}/\Delta t, \quad (4.52)$$

де $N_{\text{зб}}$ – кількість збійних вузлів за інтервал Δt .

Аналіз реконфігурації мультиагентної системи. Відповідно до загального уявлення про мультиагентну систему (4.45) вона є системою з обмеженою кількістю можливих станів. Тому її поведінку можна промодельовати за допомогою математичного апарату аналізу марковських ланцюгів.

Вважатимемо, що в процесі роботи мультиагентна система, яка складається з кінцевої множини елементів N , обмінюється інформацією між всіма елементами за алгоритмом Дейкстри, що відповідає умовам нормального функціонування системи. Цей стан початковий, який позначимо S_1 . Якщо за якимись не випадковими причинами починають виходити з ладу елементи системи чи може зникати обмін інформацією, то відбувається перехід системи до іншого стану. Елементи системи не виходять із ладу одночасно, а по одному, тому вважається, що здійснюються послідовні переходи зі стану S_1 у стани $S_2, S_3, \dots, S_i$ через певні інтервали часу Δt , i – означає номер стану. Послідовний набір станів мультиагентної системи та переходів між ними утворює ланцюг Маркова. Оскільки ланцюг послідовний, то функціонування системи можна подати у вигляді схеми «загибель-розмноження» [53].

Нехай мультиагентна система складається з n агентів, тому відповідно до підходу за схемою «загибель-розмноження» введемо стани $S_i, i=1..n+1$, де S_1 – стан системи, що відповідає функціонуванню всіх агентів без відмов. За умови впливу

зовнішніх і внутрішніх чинників з фіксованою інтенсивністю λ здійснюється перехід у стани, коли агенти відмовляють послідовно один за одним. Отже, здійснюється перехід у стан S_2 , коли не працює один агент і більше, то відповідно S_{n+1} – мультиагентна система перестала виконувати завдання у зв'язку з виходом з ладу всіх агентів. Система також може вживати заходів щодо відновлення свого функціонування, це відбувається з інтенсивністю $\mu > \lambda$. Водночас з інтенсивністю μ відбуваються послідовні переходи зі станів S_i у стани S_{i-1} . Знайдемо ймовірності p_i знаходження мультиагентної системи в кожному з кінцевих станів S_i та проаналізуємо їх. Імовірності знаходження системи у фінальних станах знаходяться за формулами [53]

$$p_i = p_0 \frac{\prod_{k=1}^i \lambda^k}{\prod_{k=1}^i \mu^k}, i \neq 0, p_0 = \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{\prod_{k=1}^i \lambda^k}{\prod_{k=1}^i \mu^k}\right)^{-1}. \quad (4.53)$$

Розглянемо цю задачу для випадку $n = 5$, $\lambda = 0,5$, $\mu_1 = 0,8$, $\mu_2 = 1,6$, $\mu_3 = 2,4$. Результати розрахунку за формулами (4.53) наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Імовірності станів мультиагентної системи в умовах реконфігурації

μ	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
0,8	0,4	0,25	0,1564	0,098	0,061	0,037
1,6	0,69	0,22	0,07	0,02	0,01	0,0001
2,4	0,79	0,17	0,03	0,01	0,0001	0,0001

Деградація станів мультиагентної системи під впливом перешкоджаючих чинників показана на рис. 4.23. Із рисунку видно, що чим більше μ , тим краще система справляється із завданнями, більше ймовірність знаходження її у працездатному стані та менше ймовірність знаходження у непрацездатному стані.

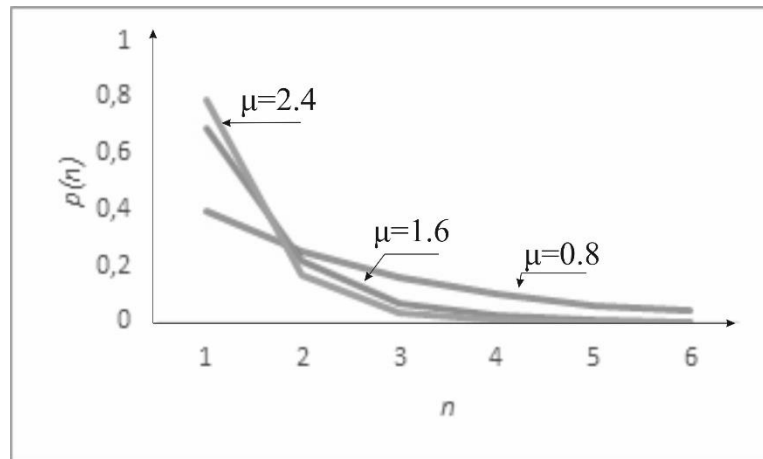


Рис. 4.23. Деградація мультиагентної системи в умовах завад

Будь-яке пошкодження системи впливає на її розмір, він зменшується, але в разі відновлення конфігурації цей показник здатний становитися рівним початковому значенню. Мінімальне значення $K_{\Sigma} = 0,2$ відповідає одному працюючому агенту.

Зважаючи на те, що агенти в процесі виконання своїх завдань роблять донесення або звіти, то мінімальний ступінь виконання завдань мультиагентною системою незалежно від її складу становить $N_{\text{вик}} = 2$.

Швидкість реконфігурації можна оцінити за показниками інтенсивності відмов λ та відновлення агентів. Як видно з рисунка, якщо $\mu > (2 \dots 5) \lambda$, то система стійкіша до перешкод різних типів.

Мультиагентні системи являють собою новий науковий напрямок організації побудови технічних систем для виконання широкого кола завдань суспільного життя. Найінтенсивніше застосування зараз їх відбувається у військовій галузі, що підтверджується практикою виконання завдань моніторингу, космічної і повітряної розвідки, груповим виконанням бойових операцій.

Застосування мультиагентних систем не можливе без вивчення проблемних питань, головним серед яких є обмін інформацією для ефективної взаємодії окремих агентів. Організація взаємодії базується на топології, відповідно до якої встановлюється адресний обмін інформацією за мінімальним маршрутом. Топологія мультиагентної системи військового призначення не є сталою, а

піддається реконфігурації в умовах дії реальних перешкод. Аналіз функціонування системи зручно зробити за відомою схемою «загибелі-розмноження» агентів та встановлення відповідних її показників, до яких можна віднести відносний розмір системи, ступінь виконання завдань та швидкість реконфігурації у сталому режимі роботи чи для певного моменту функціонування системи. Швидкість реконфігурації системи в роботі асоційовано з інтенсивністю відмов та відновленням агентів. У розрахунках за схемою «загибель-розмноження» показано, що реконфігурація ефективна, якщо вона відбувається зі швидкістю більшою за інтенсивність виходу агентів з ладу приблизно у 2–5 разів.

Подальші дослідження реконфігурації мультиагентних систем планується зосередити на аналізі їх динамічних властивостей.

4.6. Показники якості шарів управління групою

Розглянуто систему, що складається з k шарів, кожен із яких характеризується певним критерієм якості y_k , які впливають на загальний показник якості системи.

Слід зазначити, що вплив різних шарів, які беруть участь в управлінні групою, на систему заздалегідь невідомо. Це передусім пояснюється лише тим, що ефективні точки, що визначають якість шару, порівняні між собою формально. Ця додаткова інформація має відповісти на запитання: скільки одиниць виграшу за одним критерієм може компенсувати неминучий програш одиниці за іншим у наявній ситуації? За цією додатковою інформацією формується компромісне рішення поставленого багатокритеріального завдання й у результаті знаходиться шукане рішення. Отже, вплив певних шарів може виявитися компромісним, що дозволяє перейти від загального векторного виразу до скалярної згортки часткових критеріїв. Тоді математична модель розв'язання задачі може бути подана у вигляді

$$x^* = \arg \min_{x \in X} Y[y(x)] ,$$

де $Y[y(\cdot)]$ – скалярна функція, що має сенс скалярної згортки вектора часткових критеріїв, вид якої залежить від обраної схеми компромісу.

Розглянуто задачу мінімізації критеріїв k шарів, які по суті є позитивними та обмеженими:

$$M = \{y | 0 \leq y_k(x) \leq A_k, k = 1 \dots s\}, \quad (4.54)$$

де s – цілі числа, $A_k = \sup_{x \in X} y_k(x)$. У (4.54) використано нормоване значення ефективності k -шару, тобто

$$y_{0k} = \frac{y_k}{y_k^0}, k = 1 \dots s, \quad (4.55)$$

де y_k^0 – k -а компонента нормуючого вектора.

$$y^0 = \left\{ \sup_{x \in X} y_k(x) \right\}_{k=1}^s. \quad (4.56)$$

Критерій (4.56) встановлює однакову важливість висунутих часткових критеріїв.

Наглядний приклад. Розглянуто систему, що містить три шари управління, для групи із трьох апаратів. Нехай фізичний шар відповідає за якість керування. Для досягнення консенсусу за мінімальний час у групі використано релейний закон управління. У цьому разі параметром управління вважається кількість перемикачів знака управління. Консенсус в системі подано подвійним інтегратором, тоді мінімальний час досягається за одне перемикачів знака управління. Нехай якість управління оцінюється ймовірністю кількості перемикачів. Припустимо, що критерієм виступає рівноймовірний закон управління, тоді система управління забезпечує не більше трьох перемикачів знака управління для досягнення консенсусу. За цими умовами якість управління оцінюється ймовірністю

$$P(0 \leq x \leq 3) = \frac{1}{3}. \quad (4.57)$$

Ефективність типового шару зв'язку оцінюється нормальним законом розподілу. Оцінимо можливість, припускаючи, що група обмінюється повідомленнями. Знайдемо ймовірність того, що кожен з апаратів може приймати від одного до трьох повідомлень. Вважатимемо, що математичне сподівання числа повідомлень та їх середньоквадратичне відхилення дорівнюють одиниці. Тоді ймовірність оброблення апаратом від трьох повідомлень розраховується за формулою

$$P(1 \leq x \leq 3) = \Phi\left(\frac{3-1}{1}\right) - \Phi\left(\frac{1-1}{1}\right) = \Phi(2) = 0.4772, \quad (4.58)$$

де $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz$, $z = \frac{x-a}{\sigma}$, a – математичне сподівання; σ – середньоквадратичне відхилення.

Ефективність групового шару визначається інтенсивністю потоку повідомлень у каналі зв'язку. Нехай інтенсивність потоку повідомлень визначається числом λ за хвилину від одного апарата. У разі регулярного потоку повідомлень імовірність надходження повідомлень від 1, 2, 3 апаратів розраховується згідно із законом Пуассона, ймовірність приймання K повідомлень розраховується за формулою

$$P_K(x) = 1 - \sum_{i=0}^{K-1} P_i, \quad (4.59)$$

де $P_i = \frac{\lambda^i}{i!} e^{-\lambda}$, K – передбачуване число повідомлень.

Для оцінювання узагальненого показника виберемо нелінійну згортку вигляду

$$Y(\alpha, y_0) = \sum_{k=1}^3 \alpha_k [1 - y_{0k}(x)]^{-1}, \quad (4.60)$$

де α_k – невід’ємні вагові коефіцієнти, що виконуються за умовою $\sum_{k=1}^3 \alpha_k = 1$.

Вагові коефіцієнти α_k вибираються із внеску кожного параметра. Розглянемо кілька наборів α_k та оцінимо вплив кожного показника на загальний показник $Y(\alpha, y_0)$. Ці результати наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Вплив набору параметрів α_k на $Y(\alpha, y_0)$

Номер набору	Вагові коефіцієнти α			
	α_1	α_2	α_3	
1	0,1	0,2	0,7	39,73
2	0,2	0,3	0,5	30,82
3	0,3	0,4	0,3	21,91

Найкращі значення узагальненого показника для встановлених даних дає перший набір вагових коефіцієнтів.

Проведемо додаткове дослідження щодо внеску кожного критерію у формулу (4.60) за фіксованих значень інших показників для вагових коефіцієнтів набору 1 табл. 4.5. Значення досліджуваного критерію змінюватимемо в інтервалі від 0,1 до 0,99, фіксуючи кращі значення другорядних показників. Розраховані залежності подано на рис. 4.24.

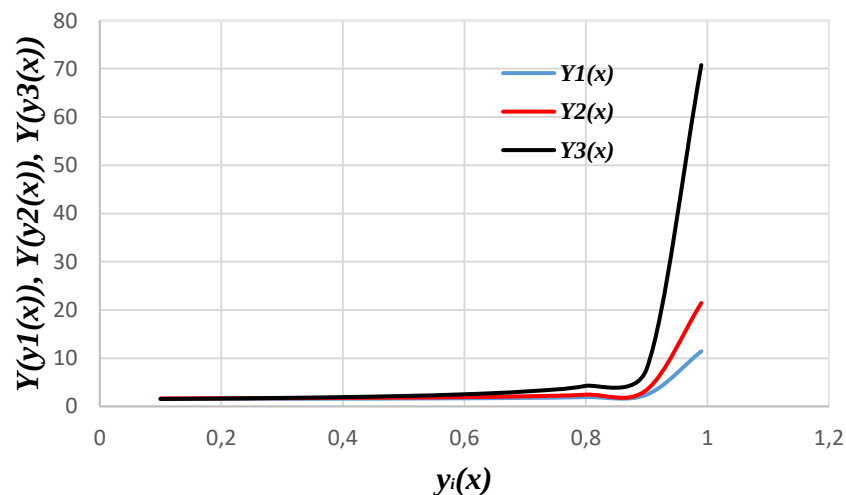


Рис. 4.24. Внесок часткових критеріїв на узагальнений показник якості системи

Аналіз рис. 4.24 показує необхідність досягнення високих показників функціонування окремих шарів, що перевищують значення 0,7. Водночас найбільшу увагу слід приділяти керованості групи. Значного підвищення показників якості можна досягти тільки завдяки кращим значенням параметрів управління, як і має бути.

На відміну від [54] тут використано нелінійну функцію компромісу (4.60) та визначено ймовірний внесок кожного шару.

Висновки до розділу 4

1. Синтезовано закон управління рухом мультиагентної системи, щоб прослідкувати за маршрутом, на якому можливі перешкоди руху. Особливістю запропонованого підходу є синтезований закон управління з гладкою функцією часу. Два шляхи подолання перешкод, один з яких ґрунтується на обході, а також на реконфігурації. Закон контролю формує дві спеціальні потенціальні функції, одна з яких створює силу тяжіння агентів до центру структури, інша відштовхує агентів від сусідів і перешкод. Конфігурація польотної групи з погляду подолання перешкод пропонує відповідні зміни розміру і форми.

2. Розроблено алгоритм, за яким було проведено моделювання мультиагентної системи. Приклади моделювання поведінки системи показують стійке переміщення агентів. Вивчення параметрів системи дає змогу забезпечити її стійкий рух і виявити відповідні параметри системи. Її поведінка містить такі етапи, як збирання в групу, стеження за заданою траєкторією і уникнення перешкод. Дослідження показують, що успішне моделювання залежить від параметрів потенціальної функцій μ та ν .

Зважаючи на те, що в умовах перешкод рух по кривій типовий, через що сигнал у каналах управління збільшується і перемикається на високій швидкості, що є так званим «ковзним режимом».

3. Найкращого виконання завдання вибору маршруту в системах високої розмірності слід очікувати в комбінуванні розглянутих алгоритмів, коли недоліки тривалістю пошуку і точності мультиагентних підходів компенсуватимуться збіжністю і точністю графових алгоритмів пошуку рішень, що допоможе реалізувати тріаду «інтелект-адаптація-управління» в досягненні властивості емерджентності розроблюваних систем.

4. Удосконалено структуру модернізованої багаторівневої системи управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів. Отримала подальшого розвитку топологія мультиагентної системи за відомою схемою «загибелі-розмноження» агентів та встановлення відповідних її показників, до яких можна віднести відносний розмір системи, ступінь виконання завдань та швидкість реконфігурації у сталому режимі роботи чи для певного моменту функціонування системи. Вона відрізняється тим, що визначено основні показники ефективності топології багатокомпонентних груп БПЛА: надійність керування, структурна компактність, ступінь централізованості та живучість групи. В розрахунках за схемою «загибель-розмноження» показано, що реконфігурація ефективна, якщо вона відбувається зі швидкістю більшою за інтенсивність виходу агентів з ладу приблизно у 2 – 5 разів.

5. Визначено показники якості шарів управління групою. Аналіз (рис. 4.24) показує необхідність досягнення високих показників функціонування окремих шарів, що перевищують значення 0,7. Водночас найбільшу увагу слід приділяти керованості групи. Значного підвищення показників якості можна досягти тільки завдяки кращим значенням параметрів управління, як і має бути.

Список використаних джерел до розділу 4

1. Korn G. A., Korn T. M. Mathematical handbook, NY: McGraw-Hill Book Company, 1968, 832 p.
2. Wang P., Li Y., Reddy C. K., Machine Learning for Survival Analysis: A Survey, ACM Computing Surveys. Vol. 51, Issue 6, 2019, pp. 1–36. URL: <https://doi.org/10.1145/3214306>.

3. Firesmith D. G. Common Concepts Underlying Safety, Security, and Survivability Engineering, 2003, Technical Note, CMU/SEI-2003-TN-033.
4. Iskolnyy B. B., Maximov R. V., Sharifullin S. R. Survivability Assessment of Distributed Information and Telecommunication Networks, Secure Information Technologies 2017 (BIT-2017), 2017, pp. 59–65. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2081/paper13.pdf>.
5. Rodríguez R. J., Merseguer J. and Bernardi S. Modelling Security of Critical Infrastructures: A Survivability Assessment, in *The Computer Journal*. Oct. 2015. Vol. 58, No. 10, pp. 2313–2327. DOI: 10.1093/comjnl/bxu096.
6. Jayabalan J. and Jeyanthi N. A Study on Distributed Consensus Protocols and Algorithms: The Backbone of Blockchain Networks, 2021 *International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, Coimbatore, India, 2021, pp. 1–10. DOI: 10.1109/ICCCI50826.2021.9402318.
7. Abbass H.A., Tang J., Amin R., Ellejmi M. & Kirby S. The computational air traffic control brain: computational red teaming and big data for real-time seamless brain-traffic integration. *The Journal of Air Traffic Control*, 56(2), 2014, pp. 10–17.
8. El-Tantawy S., Abdulhai B. & Abdelgawad H. Design of Reinforcement Learning Parameters for Seamless Application of Adaptive Traffic Signal Control, *Journal of Intelligent Transportation Systems*. Vol. 18. No 3. 2014, pp. 227–245, DOI: 10.1080/15472450.2013.810991.
9. Nsaif S. A. and Rhee J. M., "Improvement of high-availability seamless redundancy (HSR) traffic performance for smart grid communications," in *Journal of Communications and Networks*. Dec. 2012. Vol. 14. No. 6, pp. 653–661. DOI: 10.1109/JCN.2012.00031.
10. Mishra S., Ramasubramanian D. and Sekhar P. C. A Seamless Control Methodology for a Grid Connected and Isolated PV-Diesel Microgrid, in *IEEE Transactions on Power Systems*. Nov. 2013. Vol. 28. No. 4, pp. 4393–4404. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2261098.

11. Stallard N. and Todd S. Seamless phase II/III designs, *Statistical Methods in Medical Research*. *Statistical Methods in Medical Research*. Vol. 20. Issue 6, pp. 623–634. DOI: 10.1177/0962280210379035.
12. Chankaya M., Ahmad A., Hussain I., Singh B. and Naqvi S. B. Q. Grid-Interfaced Photovoltaic–Battery Energy Storage System With Slime Mold Optimized Adaptive Seamless Control, in *IEEE Transactions on Industry Applications*. Nov.–Dec. 2022. Vol. 58. No. 6, pp. 7728–7738. DOI: 10.1109/TIA.2022.3194126.
13. Therond O., Belhouchette H., Janssen S., Louhichi K., Ewert F., Bergez J.-E., Wery J., Heckelet T., Olsson J. A., Leenhardt D., Ittersum M. V., Methodology to translate policy assessment problems into scenarios: the example of the SEAMLESS integrated framework. *Environmental Science & Policy*. Vol. 12, Is. 5, 2009. Pages 619–630. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.01.013>.
14. Kuchеров D., Ogirko I., Ogirko O. Control of Information Stream for Group of UAVs in Conditions Lost Packages or Overloading, in book “Cases on Modern Computer Systems in Aviation” by T. Shmelova, Yu. Sikirda, N. Rizun and D. Kuchеров. April, 2019, pp. 128–146. URL: <https://www.igi-global.com/book/cases-modern-computer-systems-aviation/208189>.
15. Kuchеров D. P. Control of Computer Network Overload, *XVII International Scientific and Practical Conference on Information Technologies and Security (ITS 2017)*, Kyiv, Ukraine, November 30, 2017, pp. 69–75. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2067/paper10.pdf>.
16. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*. 1986. Vol. 5. No. 1. P. 90–98.
17. Jain M. C. Textbook of Engineering Physics, (Part I): PHI Learning Private Ltd, 2009, 360 p.
18. Kuchеров D., Kozub A., Kostyna O. Group behavior of UAVs in obstacles presence. 2016 *IEEE 4th International conference “Methods and systems of navigation and motion control” (MSNMC)*, October 18–20, Kiev Ukraine, pp. 51–54. DOI: 10.1109/MSNMC.2016.7783104.

19. Wooldridge M. An Introduction to multi-agent systems, John Wiley & Sons Ltd, 2013, 484 p.
20. Chen L., Liu W.-L., Zhong J. An efficient multi-objective ant colony optimization for task allocation of heterogeneous unmanned aerial vehicles. *Journal of Computational Science*. Vol. 58, 2022, art. No. 101545. DOI: 10.1016/j.jocs.2021.101545. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85122299802&doi=10.1016%2fj.jocs.2021.101545&partnerID=40&md5=137abe10b8b57543b51dc5b974923213>.
21. Xu L., Cao X., Du W., Li Y. Cooperative path planning optimization for multiple UAVs with communication constraints. *Knowledge-Based Systems*. Vol. 260, art. No. 110164. 2023. DOI: 10.1016/j.knosys.2022.110164. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85144084937&doi=10.1016%2fj.knosys.2022.110164&partnerID=40&md5=5af95718700e3b877bed99f75adc8b61>.
22. Alam M. M., Arafat M. Y., Moh S., Shen J. Topology control algorithms in multi-unmanned aerial vehicle networks: An extensive survey *Journal of Network and Computer Applications*. 2022. Vol. 207, art. No. 103495. DOI: 10.1016/j.jnca.2022.103495. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85137023405&doi=10.1016%2fj.jnca.2022.103495&partnerID=40&md5=a117dca4ccd28b5b442d978659019a88>.
23. Qin H., Shao S., Wang T., Yu X., Jiang Y., Cao Z. Review of Autonomous Path Planning Algorithms for Mobile Robots. *Drones*. Vol. 7. Is. 3. 2023, art. No. 211. DOI: 10.3390/drones7030211. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85151986785&doi=10.3390%2fdrones7030211&partnerID=40&md5=a18f8ed96d aa613485c10f935384dcc0>.
24. Xia Z., Du J., Wang J., Jiang C., Ren Y., Li G., Han Z. Multi-Agent Reinforcement Learning Aided Intelligent UAV Swarm for Target Tracking. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. 71. Is. 1. 2022, pp. 931–945. DOI: 10.1109/TVT.2021.3129504. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85120068191&doi=10.1109%2fTVT.2021.3129504&partnerID=40&md5=9b009c1972528f705efe60510f677bd4>.

25. Zhou W., Li J., Liu Z., Shen L. Improving multi-target cooperative tracking guidance for UAV swarms using multi-agent reinforcement learning. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 35. Is. 7. 2022, pp. 100–112. DOI: 10.1016/j.cja.2021.09.008. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85125520752&doi=10.1016%2fj.cja.2021.09.008&partnerID=40&md5=89b0ee0ff8cf5dda4fc892bb59559042>.
26. Zhang L., Gui H. Optimal Strategies for Agents in an Alternating Offers Negotiation Protocol Considering Time Constraint. *J. of Autom. and Control Eng.* Vol. 4 Is. 4. 2016, pp. 313–318. DOI 10.18178/joace.4.4.313-318.
27. Jesintha D.K., Anandh J.P., Ramnath M. Dynamic analysis of agent network in self organization using service level agreement technique. *International Journal of Engineering Science Invention*. Vol. 4. No 3. 2015, pp. 44–49.
28. Xu C., Xu M., Yin C. Optimized multi-UAV cooperative path planning under the complex confrontation environment. *Computer Communications*. Vol. 162. 2020, pp. 196–203. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.04.050. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090419488&doi=10.1016%2fj.comcom.2020.04.050&partnerID=40&md5=254ebff5d78cf1aa5e370d6c2f2b20e4>.
29. Zhang H., Xin B., Dou L.-H., Chen J., Hirota K. A review of cooperative path planning of an unmanned aerial vehicle group. *Frontiers of Information Technology and Electronic Engineering*, Vol. 21. Is. 12. 2020, pp. 1671–1694,. DOI: 10.1631/FITEE.2000228. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098000114&doi=10.1631%2fFITEE.2000228&partnerID=40&md5=25778b5efa394d34cf681b82668b16f6>.
30. Kucherov D.P. Agent-based approach to the problem movements by the route. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Urk. National University*. No 4 (211), 2014, pp. 168–171.
31. Çuhadar İ., Dursun M. Unmanned Air Vehicle System's Data Links. *J. of Autom. and Control Eng.* Vol. 4. No 3. 2016, pp. 189–193. DOI: 10.18178/joace.4.3.189-193.

32. Kuchеров D.P., Kozub A.N. Control System Objects with Multiple Stream of Information, proc. *IEEE 3rd Int. Conf. Actual Problems of UAV Developments (APUAVD)*”, Kyiv, Ukraine, 2015.
33. Dang A. D., Horn J. Formation Control of Leader-Following UAVs to Track a Moving Target in a Dynamic Environment. *J. of Autom. and Control Eng.* Vol. 3. No 1. 2015, pp. 1–8. DOI: 10.12720/joace.3.1.1-8.
34. Ansary MD. A. A., Hasan M. M. An Intelligent Line Following Robot with Obstacle Detection. *Int. J. of Sci. and Eng. Investig.* Vol. 5. Is. 53. 2016, pp .44–48.
35. Bouabdallah S., Siegwart R. “Backstepping and Sliding-mode Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor”, proc. *IEEE Int. Conf. on Robot. and Autom.*, Barcelona, Spain, 2005.
36. Maw A. A, Tyan M., Nguyen T. A, Lee J-W. Anytime Graph-Based Path Planning with Deep Reinforcement Learning for an Autonomous UAV. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Is. 9, art. No 3948. URL: <https://doi.org/10.3390/app11093948>.
37. Karpenko A. V. Complex «LEER» with Unmanned Aerial Vehicle «ORLAN-10». URL: [http:// bastion-opk/ orlan-10/](http://bastion-opk/orlan-10/).
38. Schurr N. The future of disaster response: humans working with multiagent teams using DEFACTO / N. Schurr, M. Janusz, T. Milind, S. Paul, J.P. Lewis, K. Nikhil. *Published Articles & Papers*. 2005. 41 p. URL: http://research.create.usc.edu/published_papers/41.
39. Chou W.Y.J. Multi-Agent coordination and optimisation in the robocup rescue project // *18-th World IMACS International Congress on Modelling and Simulation, MODSIM09*. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Cairns, Australia, 13–17 July 2009. P. 1608–1614. URL: <http://mssanz.org.au/modsim09>.
40. Chen J., Ling F., Zhang Y., You T., Liu Y., Du X. Coverage path planning of heterogeneous unmanned aerial vehicles based on ant colony system. *Swarm and Evolutionary Computation*. Vol. 69, 2022, art. No. 101005. DOI: 10.1016/j.swevo.2021.101005. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85118360909&doi=10.1016%2fj.swevo.2021.101005&partnerID=40&md5=9b54c63f963ab846041370d40cecf469>.

41. Jesintha D. K., Anandh J. P., Ramnath M. Dynamic analysis of agent network in self organization using service level agreement technique. *International Journal of Engineering Science Invention*. Vol. 4. № 3. 2015. P. 44–49.
42. Кучеров Д. П., Козуб А. М., Іванов Б. П. Інформаційне забезпечення групового польоту БПЛА. *Перспективи розвитку автоматизованих систем управління військами та геоінформаційних систем*: зб. матер. наук-практ. 29.01.15 р. Львів: АСВ, 2015. С. 249–251.
43. Dang A., Horn J. Formation control of leader-following UAVS to track a moving target in a dynamic environment. *Journal of Automation and Control Engineering*. Vol. 3. No 1. 2015. pp. 1–8.
44. Stallings William. High-Speed Networks and Internets: Performance and Quality of Service (2nd Edition). Prentice Hall (Pearson). 2002. 715 p.
45. Tanenbaum Andrew S., Wetherall David J. Computer networks. Fifth edition. Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall. 2011. 962 p.
46. Бондарев Д. П., Кучеров Д.П., Шмельова Т.Ф. Моделі групових польотів безпілотних літальних апаратів з використанням теорії графів. *Наука і техніка Повітряних Сил України*. № 3 (20). 2015. С. 68–74. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2015_3_16.
47. Shanmugavel M. Differential Geometric Path Planning of Multiple UAVs / M. Shanmugavel, A. Tsourdos, B. A. White, R. Zbikowski. *Transactions of the ASME. Journal of dynamic systems, measurement, and control*. Vol. 129. No 5. SEPTEMBER. 2007, pp. 620–632.
48. Gorbunov, I. E. Metodologiya analiza i sinteza rekonfiguriruyemykh topologiy mobil'nykh setey svyazi [Methodology for analysis and synthesis of reconfigurable topologies of mobile communication networks]. *Matematychni Mashyny i Systemy*. Is. 2. 2006, pp. 48–59.
49. Vodopianov S., Martynova O. & Krainosvit A. Development of a method of analysis of energy and information characteristics of wireless networks of critical application under conditions of limitations on the signal/(interference plus noise) ratio. *Technology Audit and Production Reserves*. Vol. 2. No 1(70). 2023, pp. 30–34. DOI:

10.15587/2706-5448.2023.278280. URL: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.278280>.

50. Cormen Thomas H., Leiserson Charles E., Rivest Ronald L., Stein Clifford. Introduction to Algorithms. Fourth Edition. MIT Press. 2022. 1312 p.

51. Kuznetsov N. A & Fetisov V. N. Enhanced-robustness Dijkstra algorithm for control of routing in the IP-networks. *Queueing Systems*. Published: Springer, 18 January 2011. Vol. 69, 2008, pp. 247–251.

52. Fortz B., Throup M. Optimizing OSPF / IS-IS weights in a changing world. *IEEE Journal on selected areas in communications*, June, 2002. P. 1–31. DOI: 10.1109/JSAC.2002.1003042.

53. Taha Hamdy A. Operations Research An Introduction. 10th edition. Pearson Education Limited. 2017. 849 p.

54. Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A., “Operator Training for Unmanned Aerial Vehicles Control” in 2019 *IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, 22–24 Oct., Kiev, Ukraine, 1–4, 2019. URL: [https://doi.org/ 10.1109/APUAVD47061.2019.8943918](https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943918).

РОЗДІЛ 5

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ УПРАВЛІННЯ ГРУПОЮ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

5.1. Системи управління з кількома потоками інформації

Сьогодні велика кількість дослідників звертає увагу на колективне керування безпілотними апаратами на основі радіодистанційного керування. Це виконання завдання пов'язане з ризиком для життя людини, необхідністю працювати в обмежений час, тривалий час виконувати рутинну роботу. До прикладних завдань колективного контролю належать проведення пошуково-спостережних робіт, гасіння пожеж на великих ділянках земної поверхні та ін. [1, 2].

Піди час керування діями групи БПЛА необхідно передавати великі обсяги інформації на наземну станцію управління. Інформація передається пакетом, що спрощує обробку інформації. Рух літака, збої в роботі обладнання, перешкоди на шляху поширення радіохвиль, деякі пакети даних можуть бути втрачені або, наприклад, може бути відсутнє підтвердження їх отримання.

Деякі автори пропонують технології планування дій мереж БПЛА, в основі яких лежить дисциплінарне планування, тобто порядок оброблення переданих пакетів [3–10]. Однак важливим завданням стає розроблення алгоритмів компенсації втрачених пакетів. Природним підходом до розв'язання цієї проблеми є повторне відправлення втрачених пакетів до точки приймання та оброблення інформації.

Режим зупинки та очікування для повторних пакетів оцінюється як неефективний спосіб відновлення втрачених пакетів. У цьому разі канал зупиняється на тривалий час до отримання серії пакетів. Перспективнішим є використання вікна, яке ковзає у потоці інформації. Якщо повторити втрачену інформацію у фіксованому вікні, можна покращити використання радіоканалу. На практиці режим вибіркової відмови також дає аналогію використання каналу [11].

Проблема, яка досліджується в пропонованій роботі, полягає в порівнянні цих технологій з погляду переваги та отримання оцінок розміру розсувного вікна.

У цій роботі розглядається проблема оцінювання завантаженості каналу передавання за наявності втрати даних на основі зазначених методів.

5.1.1. Постановка проблеми

Нехай є група з n БПЛА, яка передає інформацію на пульт оператора радіоканалом. Оператор визначає для БПЛА шлях, активну зону, маршрути управління та корекції. Оператор і БПЛА обмінюються цією інформацією, як зазвичай пакетами. Пакет – це певна кількість двійкової інформації, організована певним чином, що називається протоколом.

Усі БПЛА передають інформацію на наземну станцію управління в асинхронному режимі, тоді система оброблення вхідного потоку має вигляд

$$I = I_{UAV_1} + I_{UAV_2} + \dots + I_{UAV_n}, \quad (5.1)$$

де I_{UAV_i} – потік даних від i -го джерела та $i = \overline{1, n}$. Тут проблеми автоідентифікації, автентифікації не розв'язуються. Пакети від усіх БПЛА розглядаються як єдиний потік.

Основною проблемою під час цього передавання даних є рух БПЛА, невідповідність швидкостей оброблення в точках приймання та передавання, перевантаження буфера через пошук даних на низькій швидкості, повторне передавання даних на іншу адресу та помилки у процесі передавання даних. Отже, виникає необхідність контролювати потік даних.

Є кілька методів керування потоком даних. Серед них зупинка і очікування, повернення до M кроків, вибіркова відмова. Останні два підходи відомі як механізм автоматичного повторення запитів (ARQ) [11]. Перша схема працює у такий спосіб: якщо відправник надіслав пакет, одержувач надсилає підтвердження про

готовність отримати наступний пакет. У цьому разі маємо дві помилки. Одна помилка може виникнути через пакет передавання, а інша – через отримання підтвердження. За другою схемою відбувається введення «ковзного вікна» для передавання M -пакетів. Помилка в пакеті призводить до необхідності повторити його та наступні пакети, передані в цьому вікні. У разі вибіркового відхилення повторюються лише ті пакети, які були пошкоджені, і пакети, термін придатності яких закінчився.

Припустимо, що система складається з джерела, яке передає пакети фіксованої довжини T_{pac} , і приймача, який підтверджує своє рішення, надіславши запит. Час передавання даних в одному напрямку становить T_{dir} . Вважається, що тривалість оброблення пакетів і підтвердження передавання дуже малі, тому ними можна знехтувати, а потім час, необхідний для передавання одного пакету

$$T = T_{pac} + 2T_{dir} \quad (5.2)$$

У разі потреби, N -разів повторити передавання одного пакету до успішного приймання, яке цей час збільшує до значення

$$T = N(T_{pac} + 2T_{dir}). \quad (5.3)$$

Також наводиться ймовірність пошкодження пакету p .

У цьому документі наведено аналітичну структуру для оцінки каналу завантаження «Контроль точки БПЛА» для визначених методів управління потоком. Структура передбачала обчислення пропускної здатності потоку для системи з фіксованою затримкою та незалежним від часу бездротовим каналом.

5.1.2. Схема зупинки і очікування

Як відомо, пропускна здатність – це метрична характеристика, яка показує відношення, що обмежує кількість одиниць (елементів інформації, об'єму), що проходять через канал за одиницю часу. У нашому випадку пропускна здатність – це значення C , яке розраховується у такий спосіб

$$C = \frac{T_{pac}}{T} = \frac{T_{pac}}{T_{pac} + 2T_{dir}}. \quad (5.4)$$

Якщо встановити $\bar{t} = T_{dir}/T_{pac}$, то (5.4) можна записати у формі

$$C = \frac{1}{1+2\bar{t}}. \quad (5.5)$$

Пропускна здатність C у (5.5) нормована і набуває значення в інтервалі $[0; 1]$. Якщо $\bar{t} < 1$ тоді $C \rightarrow 1$, це відповідає високопродуктивному каналу, а якщо $\bar{t} > 1$ тоді $C \rightarrow 0$, це відповідає низькопродуктивному каналу.

Якщо виникає помилка передавання та інформація необхідна повторенням даних, що надсилаються, пропускна здатність каналу погіршується за N -разів.

$$C = \frac{1}{N(1+2\bar{t})}. \quad (5.6)$$

Загалом N у (5.6) є випадковою величиною, яка для великого інтервалу передавання визначається ймовірністю

$$N = \sum_{k=1}^{\infty} k p^{k-1} (1-p), \quad (5.7)$$

де k – кількість повторів передавання і $p < 1$. Відповідно до [12, формула (21.2–39)] запис (5.6) перетворено на

$$N = \frac{1}{1-p}, \quad (5.8)$$

тоді (5.6) запишіть у формі

$$C = \frac{1-p}{1+2\bar{t}}. \quad (5.9)$$

Формула (5.9) – це налаштування завантажувальної здатності радіоканалу в схемі із зупинкою та очікуванням.

5.1.3. Схеми ARQ

Розглянемо вплив алгоритмів ARQ, коли передавання помилок відсутнє. Для M -пакетів, що визначають розмір ковзного вікна, є два варіанти передавання інформації.

Випадок 1. Розмір ковзного вікна M перевищує час, дозволений для передачі інформації, тобто $M \geq 1 + 2\bar{t}$. У цьому разі канал не перевантажений і має найкращу продуктивність. Цей оператор дає змогу задати чисельник у (5.5) обмеженням значення часу передавання, тоді пропускна здатність дорівнює $C = 1$.

Випадок 2. Час передавання каналу обмежений розміром вікна, тобто $M < 1 + 2\bar{t}$. Тут чисельник дорівнює M , а (5.5) можна записати як

$$C = \begin{cases} 1, & \text{if } M \geq 1 + 2\bar{t}, \\ M/(1 + 2\bar{t}), & \text{if } M < 1 + 2\bar{t}. \end{cases} \quad (5.10)$$

Помилки передавання – це погіршення пропускної здатності, яка у разі вибіркової відмови, коли повернення на N кроків для одного пакету відбувається через (5.8), (5.9), набуває вигляду

$$C = \begin{cases} 1 - p, & \text{if } M \geq 1 + 2\bar{t}, \\ M(1 - p)/(1 + 2\bar{t}), & \text{if } M < 1 + 2\bar{t}. \end{cases} \quad (5.11)$$

У схемі повернення на N кроків повторно передає L пакетів. Тут кількість N кроків повернення є функцією кількості переданих пакетів

$$N = \sum_{k=1}^{\infty} f(k)p^{k-1}(1-p). \quad (5.12)$$

У (5.12) $f(k)$ – загальна кількість повторно переданих пакетів і втраченого пакету, переданого k разів, $f(k)$ можна подати у вигляді [11]

$$f(k) = 1 + (k-1)L \quad (5.13)$$

Після заміни (5.13) на (5.7) отримуємо кількість повторних пакетів

$$N = \frac{1-p+Lp}{1-p}. \quad (5.14)$$

Для виведення (5.14) суттєво використовувалися результати (21.2–38) і (21.2–39) в [12].

Підставляючи (5.14) у (5.6) і розглядаючи випадки 1 і 2 відносно розміру $M=L$ ковзного вікна, отримали пропускну здатність для ARQ-механізму на основі повернення на N кроків

$$C = \begin{cases} \frac{1-p}{1-p+Mp}, & \text{if } M \geq 1 + 2\bar{t}, \\ \frac{M(1-p)}{(1+2\bar{t})(1-p+Mp)}, & \text{if } M < 1 + 2\bar{t}. \end{cases} \quad (5.15)$$

Вирази (5.11) і (5.15) відповідають механізму управління пропускну здатністю потоку даних з ARQ. Слід зазначити, що для $M = 1$ обидва вирази вироджуються до схеми зупинки та очікування (5.9).

Вирази (5.5), (5.10), (5.11), (5.15) доводять наступну *теорему*. Якщо розмір M вікна задовольняє умову $M \geq 1 + 2\bar{t}$, то канал ефективно використовується і $C(\bar{t}) = C_{\max}$.

Наслідок. Кількість бітів одного ковзного вікна визначається виразом

$$l \geq 1 + \log_2 T_{pac} - \log_2 T_{dir}. \quad (5.16)$$

Формула (5.16) випливає з теореми і значення $\bar{t} = T_{dir}/T_{pac}$ і

$$M = 2^l - 1. \quad (5.17)$$

5.1.4. Результат моделювання

Підтвердимо отримані аналітичні результати та проаналізуємо їх. У всіх досліджуваних оцінках пропускної здатності ми припускаємо, що ймовірність помилок під час передавання пакетів даних становить $p = 10^{-3}$.

Величина M вибирається з умови (5.17), де l – кількість бітів переданого пакету. Вибрані числа 1, 7, 127, де число $M1 = 1$ відповідає схемі зупинки та очікування, $M2 = 7$ застосовується до пакетів малого розміру (3 біти), а $M3 = 127$ (7 бітів) зазвичай використовується у швидкісних глобальних мережах.

Величина кількості визначається часом передавання і часом поширення пакетів до точки контролю. Беручи до уваги різні швидкості передавання даних і різний пакет розміру передавання, значення знаходяться в інтервалі від 0 до 1000.

На рис. 5.1–5.5 наведені результати чисельного моделювання пропускної здатності для цих вихідних даних. Отже, на рис. 5.1, 5.2 показана пропускна здатність селективної схеми відхилення, яка заснована на поверненні розмірів вікна $M1$, $M2$, $M3$. На рис. 5.3 і 5.4 показані графіки пропускної здатності для різних схем розміру вікна $M2$ порівняно зі схемою зупинка і очікування.

Отже, на рис. 5.3 – відповідність для вікна розміру $M2$, а на рис. 5.4 – для вікна розміру $M3$. Узагальнення результатів показано на рис. 5.5, що допомагає зрозуміти відповідність між різними схемами управління потоком, які розглядаються.

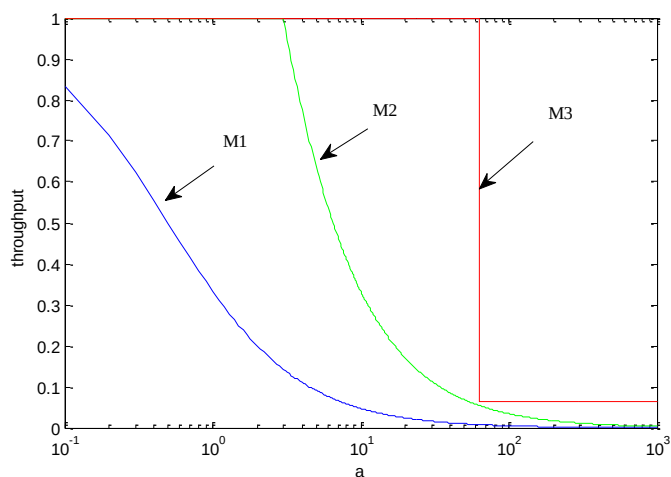


Рис. 5.1. Функція $C(a)$ для зупинки й очікування та вибіркового відхилення з ковзним вікном розмірів M1, M2, M3

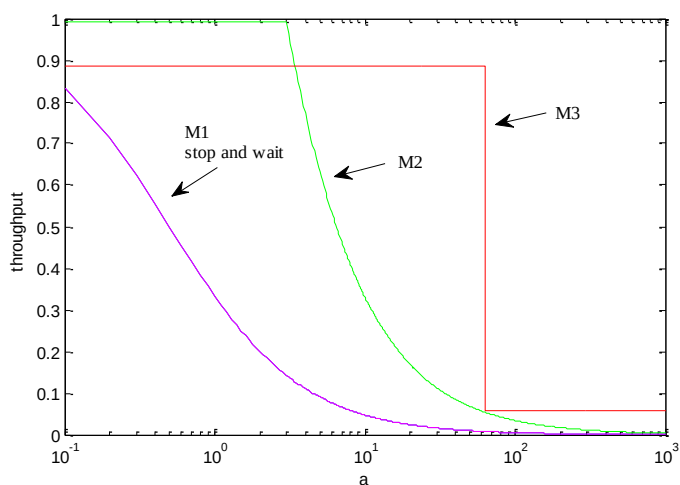


Рис. 5.2. Функція $C(a)$ для зупинки й очікування та схема ARQ на основі повернення на кроках M1, M2, M3

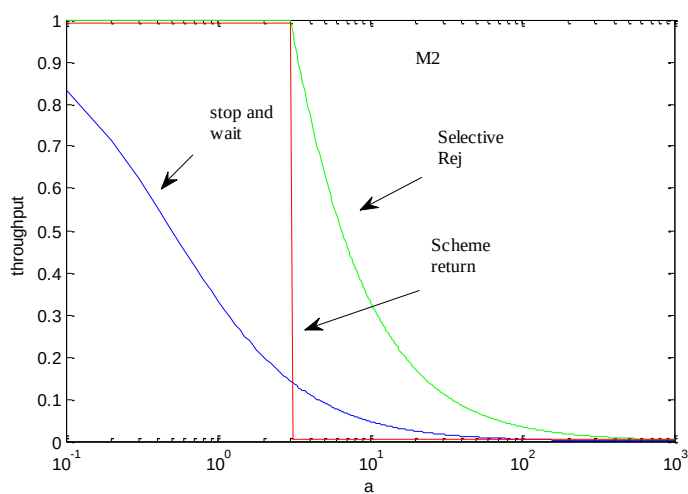


Рис. 5.3. Функція $C(a)$ для зупинки й очікування та схема ARQ на основі повернення на кроках M2

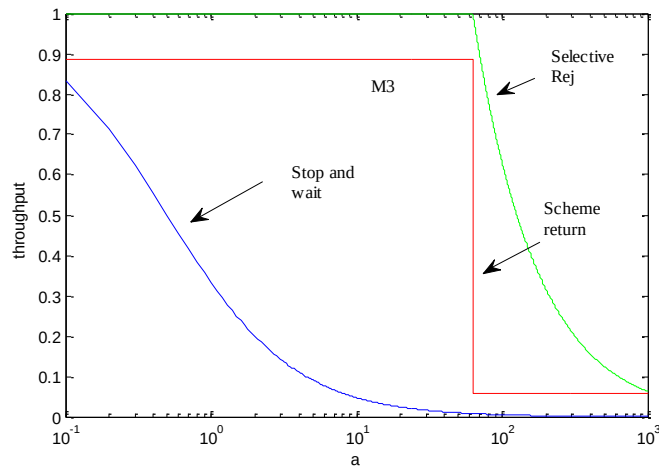


Рис. 5.4. Функція $C(a)$ для зупинки й очікування та схема ARQ на основі повернення на кроках M3

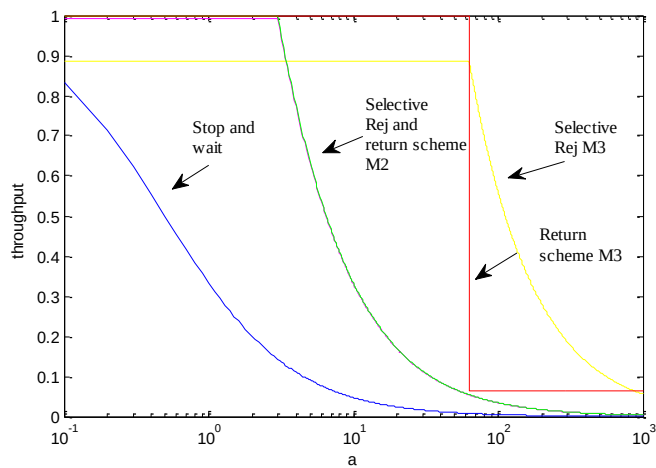


Рис. 5.5. Функція $C(a)$ для зупинки й очікування та схеми ARQ на основі повернення та вибіркового відхилення на кроках M1, M2, M3

Ці цифри показують, що якщо ефективний канал навантаження для рівня відповідності схем зупинки та очікування дорівнює $a = 1$, то для схем повернення та вибіркової відмови це приблизно дорівнює кількості M [13, 14].

5.2. Оцінювання пропускної здатності групи БПЛА під час виконання завдання моніторингу

Сучасні дослідження у сфері застосування безпілотних літальних апаратів спрямовані на пошук можливостей колективного їх використання. Такі дослідження зараз спрямовані на оборонну галузь, попередження та ліквідацію

наслідків техногенних катастроф і аварій, а також можуть бути використані для пошукових чи транспортних завдань.

Питання колективного дистанційного управління машинами (роботами) всіх сфер життєдіяльності людини (земля, вода, космос, надра землі) перебувають у полі зору вчених держав, що економічно розвинені, а щорічне зростання кількості публікацій у періодичних вітчизняних виданнях та виданнях ближнього та далекого зарубіжжя у цій галузі досліджень свідчить про актуальність обговорюваних питань.

Завдання для групи дистанційно керованих роботизованих засобів ставиться оператором, яке може бути виконано узгоджено, децентралізовано або зовсім орієнтовано на одночасне виконання різних завдань. Отже, типова структура групового управління роботизованих засобів повинна мати єдиний пульт управління з можливістю постановки завдань окремим засобам та відображення їхньої діяльності. Система, відповідно, являє собою комп'ютерну систему, яка має власне програмне забезпечення, що гармонізується з наявними операційними системами. Роботизований засіб, своєю чергою, забезпечується засобами зв'язку, орієнтування та навігації, виконавчими пристроями. Передбачається, що програмне забезпечення зможе забезпечити характеристики точності і часу виконання поставлених групі завдань.

У разі децентралізованого керування система управління роботизованим засобом має будуватися як система з елементами штучного інтелекту, що дає змогу ставити завдання власним виконавчим органам та контролювати її виконання. Звідси випливає, що кожен елемент групи повинен мати ієрархічну систему управління, що складається щонайменше з двох рівнів управління. Верхній рівень відповідає за прийняття рішень виконання завдань, а нижній рівень, своєю чергою, відповідає за якість виконуваних завдань.

Існують певні відмінності в умовах застосування повітряних та наземних апаратів, які полягають у керованості та способах доставлення роботизованих засобів до пункту призначення, корисного навантаження апарата, а також контролю за їх подальшими діями. У роботі розглянуто питання моделювання

технічного використання такої групи та оцінювання її показників технічної ефективності, пов'язаних з продуктивністю та живучістю використовуваних засобів.

5.2.1. Постановка завдання

Маємо систему, що складається з l джерел інформації, що передають серверу інформацію довільним чином (рис. 5.6). Кожне джерело є приймально-передавальним пристроєм, де передавальний пристрій передає дані, а приймач отримує сигнали готовності і кінця приймання даних. Корисна інформація становить певний блок маркованих даних. Процес приймання даних та відправлення підтвердження називатимемо обслуговуванням. Інформація збирається та передається далі для обслуговування сервером. Сервер приймає інформацію та надсилає джерелу підтвердження про отримання та обслуговування даних. Дані на сервер від одного джерела надходять з інтенсивністю λ , а інтенсивність потоку заявок від усіх джерел $\Lambda = n\lambda$. Кожне джерело обслуговується з інтенсивністю μ такою, що $\lambda \neq \mu$.

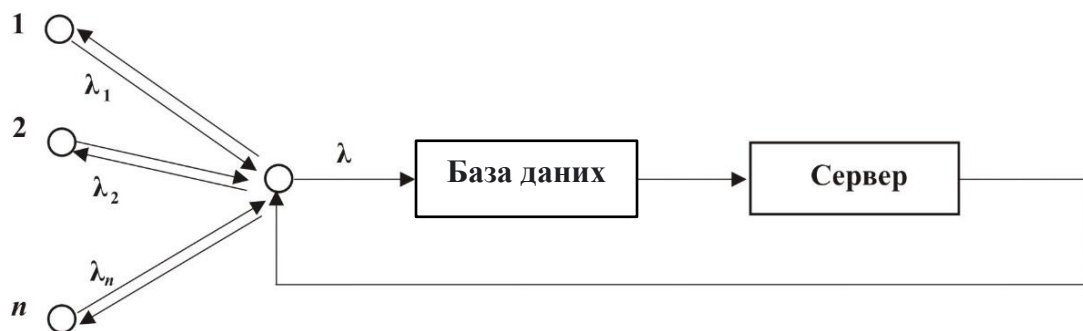


Рис. 5.6. Структура системи обслуговування з одним сервером

Сервер обслуговує джерела в порядку черги одночасно всі джерела, тому дані вишиковуються в деякому буфері, що розміщений на боці сервера, в послідовність, яку зазвичай називають чергою, де вони очікують на обслуговування, яке в середньому займає інтервал T_N . Максимальна кількість даних, які можуть бути в

черзі N , визначає розмір буфера. Дані в черзі обслуговуються в порядку надходження, тобто перший блок, що надходить, обслуговується першим (метод FIFO). Ця одноканальна система масового обслуговування (СМО) замкнутого типу з числом n станів.

Поставлено завдання знайти такі параметри системи без втрат інформації у припущенні про пуассонівський розподіл надходження та обслуговування блоків інформації, що відповідає моделі $M/M/1$ [15], і за довільного потоку обслуговування.

5.2.2. Розв'язання

Розглянемо задачу про n -джерел. Введемо такі стани: S_0 – джерела, готові для передачі інформації, S_1 – передавання інформації від одного джерела, S_2 – два джерела передають інформацію, одне із них обслуговується сервером, а інформація від другого завантажується в буфер; S_n – усі джерела передають інформацію, одне обслуговується, є інформація, що розміщена у буфері.

Оскільки інформація надходить від усіх джерел одночасно, потік заявок на обслуговування становить Λ , а обслуговування відбувається з інтенсивністю μ . Тоді система рівнянь для обраної схеми функціонування системи має вигляд

$$\begin{aligned} p_1 &= n\rho p_0, \\ p_2 &= n(n-1)\rho^2 p_0, \\ &\dots \\ p_n &= n!\rho^n p_0, \\ p_0 &= [1 + n\rho + \dots + n!\rho^n]^{-1}. \end{aligned} \tag{5.18}$$

Імовірності кожного зі станів є розв'язок системи рівнянь (5.18). Ухвалені показники ефективності розраховуються на підставі цих розв'язків. Беручи до уваги, що всі заявки, не враховуючи час обслуговування, будуть, зрештою, обслуговані, вважатимемо відносну пропускну здатність системи рівною 1. Тоді

абсолютну пропускну здатність можна оцінити за ймовірністю зайнятості сервера з урахуванням інтенсивності сервера μ , тобто

$$A = \mu(1 - p_0). \quad (5.19)$$

Визначимо середнє число джерел, інформація від яких розміщена в системному буфері, як величину, яка відрізняється від загальної кількості не обслугованих джерел $w_{\text{необ}}$ на кількість тих джерел, інформація яких обробляється $w_{\text{об}}$.

Число джерел, які не перебувають у категорії обслугованих $w_{\text{необ}}$, міститься як потік інформації, що відповідає абсолютній пропускну здатності, тобто з рівності

$$(n - w_{\text{необ}})\lambda = (1 - p_0)\mu. \quad (5.20)$$

Число не обслугованих джерел $w_{\text{необ}}$ з (5.20) дорівнює

$$w_{\text{необ}} = n - \frac{(1-p_0)}{\rho}. \quad (5.21)$$

Кількість джерел $w_{\text{об}}$, інформація від яких обслуговується, дорівнює

$$w_{\text{об}} = 1 - p_0. \quad (5.22)$$

Тоді кількість джерел інформації, що розміщені в буфері, визначається формулою

$$w_{\text{буф}} = n - \frac{(1-p_0)}{\rho} - (1 - p_0) = n - (1 - p_0)(1 + 1/\rho). \quad (5.23)$$

Показники зайнятості та пропускної здатності (5.19)–(5.23) розраховуються вважаючи, що виконуються умови для пуассонівського потоку подій, а саме ординарності, стаціонарності та відсутності післядії в потоці даних [16, 17].

Насправді вимога післядії не виконується. Виникає необхідність обліку малого інтервалу часу τ між сусідніми інтервалами обслуговування, що необхідний для приведення в стан готовності до чергового обслуговування та свідчить про наявність обмеженої післядії в потоці даних (див., наприклад, [18, підрозділ 19.5]). Стани системи, не прив'язані до номера джерела, визначаються лише готовністю передати інформацію, тому для сервера однаково рівноцінні. З огляду на обмежений характер післядії, маємо потік подій Пальма [16, с. 206], а система являє собою систему масового обслуговування з очікуванням.

Припустимо, що цей потік отриманий просіюванням найпростішого потоку, в якому інтервал часу T між сусідніми подіями складатиметься з двох підінтервалів: відрізка часу надходження T_1 та малого інтервалу післядії τ . Щільність розподілу потоку обслуговування підпорядковується закону Ерланга 2-го порядку та визначається формулою

$$f_2(t) = \mu^2 t e^{-\mu t}, \quad (5.24)$$

де $\mu = T_{\text{обс}}^{-1}$ – інтенсивність потоку обслуговування заявок, а основні параметри розподілу відповідно до [15] мають вигляд

$$m_{(2)} = \frac{2}{\mu}, \quad D_{(2)} = \frac{2}{\mu^2}, \quad \sigma_{(2)} = \frac{\sqrt{2}}{\mu}. \quad (5.25)$$

Оскільки вхідний потік є немарковським, класичний підхід на основі системи диференціальних рівнянь Колмогорова тут непридатний. Для аналізу такої системи застосовується метод розширення фазового простору або сучасніші підходи, такі як матричні аналітичні методи. Метод розширення фазового простору застосовується для обмеженого числа псевдостанів, у разі n -джерел число

псевдостанів може виявитися значним, що збільшує обчислювальну складність завдання.

Зробимо оцінювання параметрів системи з використанням формул Полячека-Хінчина [16]. Введемо міру випадковості для потоку обслуговування як коефіцієнт варіації v

$$v = \frac{\sigma_{(2)}}{m_{(2)}}, \quad (5.26)$$

значення якого 0 і 1 відповідають регулярному (невипадковому) та найпростішому потоку даних. Тоді середнє число даних $\bar{r}$, що у черзі, і середній час очікування у черзі $\bar{t}_{оч}$ виражаються формулами

$$w_{буф} = \frac{\rho^2(1+v^2)}{2(1-\rho)}; \quad (5.27)$$

$$\bar{t}_{оч} = \frac{\rho^2(1+v^2)}{2\Lambda(1-\rho)}, \quad (5.28)$$

де ρ – коефіцієнт завантаження системи, що вказує середню кількість обслугованих заявок у потоці за середній час обслуговування, тобто $\rho = \Lambda/\mu$.

5.2.3. Приклад виконання завдання

Розглянемо систему БПЛА, що складається із трьох апаратів, яка проводить моніторинг повітряного простору протягом двох годин. Сеанс зв'язку із сервером кожного джерела відбувається кожні 20 хв. Інтервал обслуговування кожного апарата займає приблизно 10 хв. Оцінімо показники пропускної здатності системи та оцінімо вимоги до буфера, що збирає інформацію для обслуговування. Для заданих вихідних даних маємо $n = 3$, $\lambda = 3$, $\mu = 6$, $\rho = 0,5$. Відповідно до (5.18)

$$p_0 = [1 + 3 \cdot 0,5 + 3 \cdot 2 \cdot (0,5)^2 + 3! \cdot (0,5)^3]^{-1} = 0,21.$$

Абсолютна пропускна здатність сервера відповідно до (5.19)

$$A = 6 \cdot (1 - 0,21) = 4,74 .$$

Середня кількість необслугованих апаратів (5.21)

$$w_{\text{необ}} = 3 - \frac{(1 - 0,21)}{0,5} = 1,42 .$$

Розмір буфера повинен бути узгоджений із величиною (5.23)

$$w_{\text{буф}} = 3 - (1 - 0,21) \cdot (1 + 2) = 0,63 .$$

Під час переходу часу обслуговування розподілом Ерланга 2-го порядку з параметрами $m = 0,33$, $\sigma = 0,24$, $\nu = 0,72$ отримуємо довжину буфера з урахуванням післядії за формулою (5.27)

$$w_{\text{буф}} = \frac{0,5^2(1+0,72^2)}{2(1-0,5)} = 0,38 .$$

Аналіз отриманих цифр дає змогу дійти невтішного висновку, що облік післядії послаблює вимоги до обсягу буфера.

У дослідженні наведено загальний підхід до розрахунку показників інформаційного трафіку повітряної інформаційної системи, що складається з n безпілотних літальних апаратів, що виконують завдання моніторингу земного простору на тривалому інтервалі часу. Це дає можливість за умови часу моніторингу $T \rightarrow \infty$ застосувати для розрахунку систему алгебричних рівнянь станів системи, аналогічно тій, яка використовується під час аналізу безперервних марковських ланцюгів – «схему загибелі та розмноження». Цей підхід

справедливий у разі, коли інформаційний потік можна подати пуассонівським, що не завжди є адекватною заміною. Також розглянуто підхід, що ґрунтується на обліку післядії. За таких умов початкова схема розрахунку не виконується, а виникає необхідність застосування інших підходів, зокрема заміни експоненціального розподілу інтервалів між подіями на Ерланга 2-го порядку. І тут тимчасові показники до системи розраховуються формулами Полячека-Хінчина [5].

5.3. Оцінювання готовності оператора виконувати завдання управління безпілотними повітряними платформами

Сучасні успіхи в галузі мікроелектроніки та електромеханіки дали змогу створити безпілотні літальні апарати, які ефективно використовуються для виконання різних завдань [19]. Управління безпілотним транспортним засобом може виконуватися вручну, автоматично та напіваавтоматично, де роль людини як оператора дуже важлива як під час підготовки, так і під час польоту. Віддаленість оператора від засобів управління створює декілька труднощів в управлінні польотом, насамперед пов'язаних із затримкою управління, неадекватним поданням інформації про навколишнє середовище та динамікою самого процесу управління.

Типова система управління польотом містить оператора, бортове приймально-контрольне обладнання та наземну передавальну станцію, як правило, планшетний комп'ютер із програмним інтерфейсом, і сам літальний апарат. У керуванні військовою безпіотною машиною, як правило, беруть участь два оператори, один з них відповідає за контроль руху транспортного засобу (оператор літака), а другий забезпечує виконання цільового завдання (оператор навантаження цільового завдання). Отже, управління безпіотною повітряною платформою не є простим завданням, але вимагає навчання оператора навичкам, які допоможуть йому впоратися з труднощами управління в умовах природних та штучних

перешкод, втрати каналу зв'язку, втрати прямої видимості, затримки та спотворення переданої інформації, управління багатьма пристроями тощо.

Для досягнення цілі в кінцевій точці потрібно значно більше часу для підготовки платформи до польоту в автоматичному, ніж у ручному або напівавтоматичному режимах. Ці умови передбачають виконання багатьох вимог до практичних навичок операторів, які можуть забезпечити реалізацію мети в реальних умовах польоту.

Наш внесок полягає у розробленні універсального методу оцінювання продуктивності операторів на основі вимірювання таких показників, як час реакції, точність операції, стійкість до стресів, придатність розуму та рук, підготовленість та передбачення. Запропонований метод придатний не тільки для оцінювання продуктивності операторів БПЛА, але й операторів деяких інших галузей, де високі вимоги висуваються до організації праці.

Ця робота є розширеною версією звіту [19], подано на 5-й Міжнародній конференції «Актуальні проблеми розробки безпілотних літальних апаратів» (APUAVD), де запропоновано метод оцінки діяльності оператора з огляду на вивчення його психофізичних реакцій.

Аналітичний огляд впливу людського чинника на ефективність використання безпілотних літальних апаратів на сьогодні та у найближчому майбутньому наведено у [20]. У дослідженні наголошується на необхідності спеціальної підготовки оператора БПЛА, яка, в принципі, відрізняється від тієї, до якої залучені пілоти. Огляд також зазначає необхідність проведення додаткових наукових досліджень щодо навичок, знань і здібностей операторів БПЛА та способів їх оцінювання.

У роботі [21] зазначається важливість впливу людини-оператора на ефективність та якість управління безпілотними літальними апаратами. У статті зазначається, що близько 70 % усіх аварій, пов'язаних з БПЛА, спричинені помилковою діяльністю людини. Незважаючи на високий рівень автоматизації, людина не вилючається з роботи системи управління, а навпаки, посідає провідне місце у підготовці, проведенні та виконанні завдань, виключно з ризиками,

пов'язаними зі смертю пілота. Наявність кількох операторів передбачає координацію їхніх дій та взаємодію для досягнення кінцевої мети використання одного або групи пристроїв.

У роботах [22–26] розглядаються чинники, що впливають на підготовку та якість експлуатації безпілотних платформ операторами. Отже, ефект від просторових можливостей, отриманих оператором за допомогою БПЛА, був оцінений у [22]. Почуття простору надає впевненості оператору під час дії в будь-якій ситуації в будь-який час доби та з будь-якою метою.

У роботі [23] запропоновано опис симулятора для оператора БПЛА з широкими можливостями моделювання, а саме: управління польотом, бездротовий зв'язок та наземне обладнання. Однак у статті не наведено параметри та методи оцінювання оператора.

У роботі [24] помилки оператора БПЛА наведені у вигляді кривої хі-квадрат розподілу Пірсона, отриманої побудовою гістограми щільності ймовірності вимірювань помилок у діяльності оператора.

Автори [25] пропонують оцінити можливості оператора БПЛА за профілем, сформованим спеціальним програмним забезпеченням. Як оцінки пропонуються метрики, які гуртуються на поєднанні методів нечіткої логіки та кластерного аналізу. Запропоновані методи дають змогу оцінити оператора не тільки окремого пристрою, але й управління групою.

Помилки технічного характеру були проаналізовані в [26]. Це вказує на технічні проблеми, з якими стикається оператор, а саме на обмежене поле зору, затримки передавання інформації, погане розуміння оператором ситуації, у якій перебуває безпілотний апарат, та помилки бортового обладнання.

Методичний комплекс для пришвидшеного навчання операторів БПЛА наведено в [27], складовими якого є контрольні ситуації з відповідними труднощами та інтенсивність їх реалізації протягом певного часу. Передбачається, що під час підготовки оператора цим комплексом узагальнений показник готовності оператора набуває деякого стійкого значення.

У роботі [28] автори досліджують часові норми підготовки операторів для формування необхідних психофізіологічних характеристик персоналу для безпілотних авіаційних систем. Дослідження спирається на навчальні програми для військово-повітряних сил. Оцінка якості готовності операторів та методів їх сертифікації в дослідженні не розглядається.

Корисність практичних розробок, спрямованих на навчання операторів, які готові працювати в умовах, коли обладнання перебуває на межі виходу з ладу, запропоновано в [29].

У роботі [30] наведено систему моделювання динаміки, яка дає змогу аналізувати чинники, що впливають на підготовку професійних навичок операторів вугільних шахт. Робота досліджує підготовку операторів протягом тривалого часу. Також визначається пріоритет, важливе місце серед яких займає здатність працювати в складних умовах.

Для деяких галузей важливо підтримувати продуктивність оператора в умовах, коли порядок дій змінюється [31, 32]. У цьому разі існує необхідність перерозподілити процедуру та змінити графік тренувань, і тоді корисно запропонувати процедуру тренувань із втратами. Автори також ввели показник досвіду оператора [31]. Показник кваліфікації у дослідженні поданий багатоцільовою функцією, яка бере до уваги показник кваліфікації та робочий час. У дослідженні [32] запропоновано додатковий показник – пункт стандартизації.

Італійський концерн Terna [33] розробив три основні програми для навчання та сертифікації операторів у режимі реального часу: початкова програма, ковзаюче (безперервне) навчання та загальна програма для інших зацікавлених сторін. Навчання налаштовано на конкретну роль кожного оператора в режимі реального часу і охоплює всю його оперативну діяльність. Окрім того, компанією розроблено тренажер з експлуатаційного навчання (OTS).

Автори роботи [34] оцінили розумове навантаження операторів, основною професійною діяльністю яких є управління повітряним рухом, та здобувачів освіти, порівнявши постійну експозицію, близьку до інфрачервоного діапазону, та мобільну сенсорну панель того ж діапазону, яку одягають на голову оператора.

Дослідження виявило можливість використання гнучкої сенсорної панелі для оцінювання розумового навантаження операторів, залучених до управління повітряним рухом, на основі повторення вимірювань та техніки ANOVA.

У роботі [35] запропоновано методологію розвитку психомоторних навичок за допомогою засобів навчання. Результати дослідження показали позитивний вплив на розвиток психомоторних навичок у людей різних категорій.

У роботі [36] розглянуто оцінювання слуху людини методами за допомогою системи клінічної аудіометрії. Було розроблено та випробувано біотехнологічну систему оцінювання та стимулювання слухового аналізатора людини під впливом різних чинників, що дало змогу вивчити вплив звукових частот на пацієнта.

Метод навчання групи агентів наведено в [37]. Навчання засноване на введенні Q-функції, результат якої залежить від спільних дій пари агентів. На жаль, результат характеризується обмеженими елементами, що беруть участь у процесі навчання, і розглядаються прості сценарії.

У [38–40] розглянуто систему управління БПЛА, яка може стати основою для побудови тренажера, призначеного для навчання, підготовки та сертифікації операторів.

На підставі огляду проведених досліджень можна зробити висновок, що існує велика користь у розробленні та впровадженні відповідних методів, які зроблять процес сертифікації оператора більш точним.

5.3.1. Особливості управління безпіотною платформою

У цьому розділі стисло розглянуто узагальнений структурний склад типової безпіотної платформи, основні проблеми управління польотом та вимоги до дій оператора.

5.3.2. Структура системи

Структура автоматизованої системи управління БПЛА з людиною-оператором у контурі управління має вигляд, показаний на рис. 5.7. Робоче місце оператора – це пульт дистанційного керування, що забезпечує кілька елементів управління, доступних на екрані дисплея.

5.3.3. Проблеми управління польотом

Вразливим місцем для управління платформою БПЛА є канал управління польотом. Проблема тут полягає в обмеженій пропускну́й здатності каналу управління радіо, оскільки вузькосмуговий шлях вважається сприйнятливим до перешкод сигналам, які виникають у радіоканалі. У польоті можливі також втрати зв'язку; в місцях із сильним відбиттям можуть прийматись помилкові сигнали та команди радіокерування. Окрім того, складність управління радіокомандами полягає в низькій швидкості передавання даних.

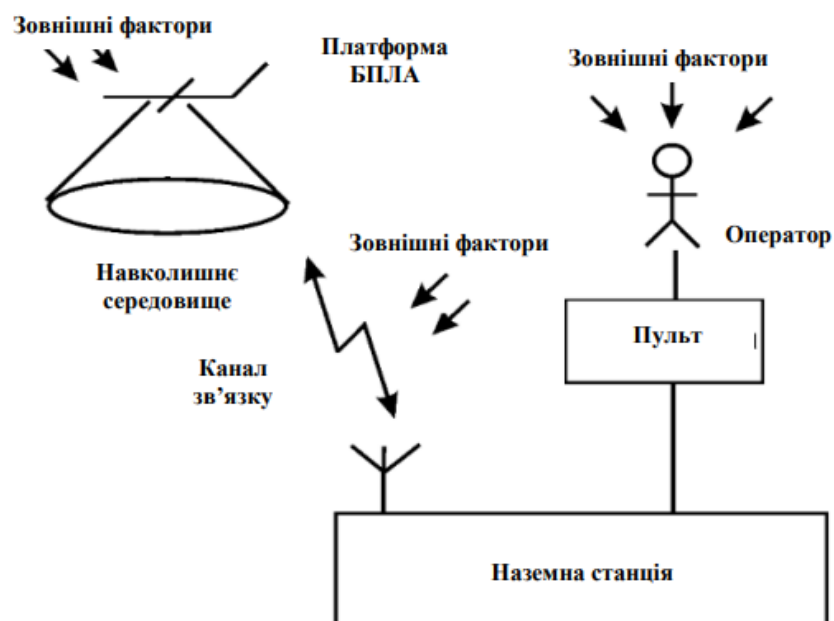


Рис. 5.7. Структура автоматизованої системи управління БПЛА

5.3.4. Дії оператора

Оператор, що керує польотом БПЛА, повинен знати режими та параметри каналу управління, що забезпечують стабільний політ платформи; вміти вносити корективи в управління польотом; знати умови перемикання ручного та напівавтоматичного режимів на автопілот; бути готовим вийти з автопілота з відповідним дозволом.

Оператор, відповідальний за виконання цільового завдання, повинен добре знати можливості використовуваного обладнання, одержувати наявними камерами, вміти отримувати корисну інформацію з отриманих даних, а також тісно співпрацювати з оператором управління польотом.

5.3.5. Постановка проблеми

Тривала робота з консоллю висуває деякі конкретні вимоги до оператора. Ситуація, що відображається на екрані пульта дистанційного керування, схожа на комп'ютерну гру, а тому дії оператора схожі на реакції досвідченого гравця. Основними серед них є реакція на подію, її точність, сприйняття та розуміння відображуваної ситуації з певною затримкою, придатність розуму та рук, що характеризується стійкістю до тривалої роботи; стресостійкість, що визначається ступенем стійкості до негативних впливів та нештатних ситуацій; передбачення – це можливість побачити або відчувати ймовірні майбутні події, які можуть відбутися.

Пропонуються такі показники роботи оператора:

- час реакції t вважається основним параметром, що характеризує поведінку оператора; вона визначається часом виникнення подразника до реакції на подію;
- точність операції ε – є ступенем відповідності даних, зчитуваних оператором, значенням, зчитаним з екрана;
- експозиція τ – час, коли оператор розуміє ситуацію, що відображається;
- придатність розуму та рук ν – характеризується частотою помилок, які виникають у роботі оператора;

- стресостійкість k – показує ступінь стійкості до негативних впливів чинників тиску;
- підготовленість Σ – сукупність знань, навичок та умов психічних та фізіологічних функцій, що встановлюють його здатність виконувати певні дії з певною якістю;
- передбачення λ – здатність бачити або відчувати можливе майбутнє, яке відбудеться найближчим часом.

Аналіз обраних показників показує їх неоднорідність. Існують часові показники, оцінені за абсолютними показниками – це вимірний час реакції t та час експозиції τ , вимірний у секундах. Частоту помилок v вимірюватимемо у відносних одиницях, поки $v \leq v_{\max} \leq 1$, значення $v_{\max}$ відповідає неприпустимому рівню помилок. Загалом запишемо $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$, де бажане значення $v_{\min} \approx 0$. Толерантність до стресу k , підготовленість Σ та передбачення λ слід оцінювати в балах. Точність операції ε під час використання, наприклад, стилуса або іншого маніпулятора, оцінюється відстанню між справжніми значеннями та точними координати в масштабі дисплея на екрані, що вимірюється в міліметрах.

Припускаючи, що реальні показники оператора можуть бути в деяких інтервалах, дозволених різними стандартами, тоді ми запропонуємо, щоб вимірюваний параметр перебував в інтервалах

$$\underline{\xi} \leq \xi_i \leq \bar{\xi}, \quad (5.29)$$

де $\underline{\xi}$, $\bar{\xi}$ – мінімальні та максимальні значення вимірюваних параметрів, $i = 1 \dots N$; N – кількість показників.

Також виявляється неоднорідність цих параметрів у невідповідності значень показників. Наприклад, значення часу реакції t , точність операції ε , взаємодія розуму та рук за частоти помилок v повинні бути мінімальними, а експозиція τ ,

стресостійкість k , підготовленість Σ та передбачення λ для оператора-майстра відповідають вищим значенням у їх діапазонах.

Запропоновано оцінити узагальнений показник придатності оператора за відношенням

$$J(\xi_i | i = 1 \dots N) \geq J_{\min}, \quad (5.30)$$

де $J_{\min}$ – певне порогове значення показника, за яким приймається рішення про допуск оператора до діяльності. Називатимемо J як продуктивність оператора.

Завдання – знайти метод для визначення значення $J_{\min}$ за виразом (5.30) за наявності вимірюваних параметрів ξ_i задовольняючи нерівність (5.29), що допоможе встановити нерівність (5.30), що дасть об'єктивну оцінку оператору щодо готовності виконати завдання управління безпілотною платформою, зважаючи вплив неоднорідностей.

5.3.6. Техніка розв'язання

У цьому розділі розглянуто підхід до розрахунку критерію та методологію розрахунку продуктивності оператора.

5.3.7. Критерії оцінювання оператора

Оцінка продуктивності оператора на основі введеного набору показників обчислюватиметься у вигляді лінійної функції, записаної у такий спосіб

$$J = \sum_{i=1}^N \alpha_i \sigma_i, \quad (5.31)$$

де α_i – i -й ваговий коефіцієнт; σ_i – i -й нормований параметр.

$$\sigma_i = \frac{\bar{\xi} - \xi_i}{\bar{\xi} - \underline{\xi}}, \quad (5.32)$$

де ξ_i – виміряне значення параметра, $i = 1 \dots N$. Накладено обмеження на вагові коефіцієнти

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1. \quad (5.33)$$

Тепер завдання оцінювання якості підготовки оператора зводиться до визначення величини $J_{\min}$ з невідомими ваговими коефіцієнтами α_i .

Оскільки введені показники по-різному впливають на величину $J_{\min}$ і здебільшого суперечливі, наприклад, такі показники, як час реакції t , точність (похибка) ε та придатність v повинні бути малими, а інші мають бути такими самими, як можливо, має сенс розділити ці чинники на дві протилежні групи та розв'язати задачу максимізації, беручи до уваги однаковий внесок кожного компонента, тобто визначити порогове значення як

$$J_{\min} = \max_{\alpha_i} \left(\frac{1}{m_1} \sum_{i=1}^{m_1} \alpha_i \sigma_i^+ + \frac{1}{m_2} \sum_{i=m_1+1}^{m_2} \alpha_i \sigma_i^- \right), \quad (5.34)$$

де $m_1 + m_2 = N$, у разі розглянутих параметрів $N=7$.

Вирази (5.31), (5.32), (5.34), а також беручи до уваги (5.29)–(5.33) забезпечують знаходження порога $J_{\min}$.

5.3.8. Підхід до розрахунку

Процедура обчислення складається з таких кроків:

1. Вимірюються значення вектора параметрів ξ , що задовольняють нерівність (5.29).

2. Обчислюється значення коефіцієнтів α_i методом ієрархічного аналізу, включно з підготовкою матриці A попарних порівнянь розміру $p \times p$, де p – кількість критеріїв. Діагональні елементи матриці A задаємо рівними 1, обчислюємо значення елементів α_{ij} з огляду на важливість вимірюваного параметра так, щоб параметр набув значення в діапазоні, наприклад, від 1 до 9. У разі, коли стикаємося з найважливішим параметром, він набуває значення 9, інакше найменш важливим буде 1. Елемент $\alpha_{ij} = 1/\alpha_{ji}$.

3. Відтак перевіряється виконання умови узгодженості для матриці попарних порівнянь шляхом обчислення коефіцієнта узгодженості CC

$$CC = \frac{p(p_{\max} - p)}{1,98(p-1)(p-2)}. \quad (5.35)$$

Якщо $CC \leq 0,1$, рівень узгодженості матриці A вважається прийнятним; в іншому разі перевіряється матриця A .

4. Визначається значення $J_{\min}$ (5.34).

Вимірюємо параметри вектора ξ для конкретної людини-оператора, застосовуючи (5.30), (5.29) і (5.32).

Наслідок 1. Величина J задовольняє умову $0 < J \leq J_{\max}$.

Наслідок 2. Значення $J_{\max} = 1$.

5.3.9. Моделювання

Важливим моментом під час моделювання є вибір відповідних параметрів і оцінювання результатів. Ці питання розглянуто в цьому підрозділі.

Деякі відомості про значення параметрів. Час реакції оператора визначається часами затримки сигналу t_i в i -му пристрої керування та затримкою сигналу від моменту розпізнавання оператором ситуації до відповідної реакції t_{del} , або

$$t = \sum_{i=1}^n t_i + t_{del} , \quad (5.36)$$

де n – загальна кількість елементів керування. Затримка, введена оператором, значно перевищує контрольну затримку комп'ютера. Це значення міститься в діапазоні 100...500 мс, що відповідає реакції геймера. Найкращим показником є менше значення.

Час експозиції τ ока оператора також визначається двома чинниками: здатністю помітити новий об'єкт, який світиться і часом усвідомлення цього об'єкта. Навчене око здатне помітити спалахи світла тривалістю 5–10 мс, однак цей параметр залежить від навколишнього освітлення. Американський учений Б. Лібет встановив, що свідомо діяльність людини проявляється через 300–500 мс після того, як він захотів поворухнути рукою [41].

Точність ε дій оператора визначається товщиною пристрою користувача та розміром плями на екрані, яку оператор повинен надійно перекривати пристроєм, що використовує. Дія оператора буде виконана в разі захоплення 50 % плями екрана кінчиком стилуса. Наприклад, якщо діаметр наконечника стилуса 1,9–2 мм, то приблизно 1 мм – це точність оператора [42].

Рівень операторських помилок ν залежить від ступеня підготовленості, завантаженості, втомі внаслідок тривалої роботи. За експериментальними даними, отриманими під час оброблення візуальних сигналів [43], отримано такі результати: для початківців, які не мають досвіду, коефіцієнт помилок становить 0,27, для операторів, які пройшли чотири і більше тренінгів, цей показник становить 0,018. Оскільки непідготовлених операторів, як правило, немає, максимальне значення показника можна взяти 0,15.

Показники, що оцінюються за бальною шкалою, до якої входять стресостійкість k , підготовленість Σ , далекоглядність λ , також можна оцінити за категоріальною шкалою: відмінно, добре, задовільно, погано. Вибравши цю шкалу

за основу, можна скласти таку відповідність. Категорія «відмінно» оцінюється в 8–9 балів, «добре» – 5–7 балів, «задовільно» – 3–4 бали, «погано» – 1–2 бали.

5.3.10. Числові приклади

Вихідні дані, взяті за норму, наведені в табл. 5.1. Дотримуючись процедури, описаної в підрозділі «розв’язання», і формул (6.31), (5.32), (5.34) для $N = 7$ знайдено вагові коефіцієнти, які задовольняють умову узгодженості для вихідної матриці попарних порівнянь (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Перший набір даних

Параметри	$\underline{t}$	$\underline{\varepsilon}$	$\underline{\tau}$	$\underline{v}$	$\bar{k}$	$\bar{\Sigma}$	$\bar{\lambda}$
Значення	0,25 с	0,9 мм	0,4 с	0,07	3	3	2
σ_i	0,625	0,5	0,5	0,6	0,25	0,25	0,25

$$\alpha_{\underline{t}} = 0,1017, \alpha_{\underline{\varepsilon}} = 0,1835, \alpha_{\underline{\tau}} = 0,2602,$$

$$\alpha_{\underline{v}} = 0,4545, \alpha_{\bar{k}} = 0,5972, \alpha_{\bar{\Sigma}} = 0,2847, \alpha_{\bar{\lambda}} = 0,1181.$$

За допомогою методу ієрархічного аналізу [44] були визначені ваги, які задовольняють умову узгодженості для вихідних матриць попарних порівнянь A . Відтак, керуючись (5.34), отримали значення $J_{\min} = 0,2788$. Слід зазначити, що умова (5.33) виконується лише для складових виразу (5.34), взятих у дужки.

Тепер перевіримо вагові коефіцієнти для інших, явно гірших значень розглянутих параметрів, наприклад, для даних табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Другий набір даних

Параметри	$\underline{t}$	$\underline{\varepsilon}$	$\underline{\tau}$	$\underline{v}$	$\bar{k}$	$\bar{\Sigma}$	$\bar{\lambda}$
Значення	0,6 с	1,5 мм	0,55 с	0,2	2	2	2
σ_i	–0,25	–2,5	–0,25	–0,38	0,88	0,88	0,88

Отримуємо значення $J = 0,1536$, яке не задовольняє умову (5.30).

Тепер розглянемо кращі показники, ніж у табл. 5.2, і оцінимо ці результати, табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Третій набір даних

Параметри	$\underline{t}$	$\underline{\varepsilon}$	$\underline{\tau}$	$\underline{v}$	$\bar{k}$	$\bar{\Sigma}$	$\bar{\lambda}$
Значення	0,2 с	0,85 мм	0,35 с	0,05	8	8	8
σ_i	0,75	0,75	0,75	0,76	0,125	0,125	0,125

Отримаємо значення $J = 0,8783$, яке повністю задовольняє умову (5.35). Отримані результати повністю збігаються з висунутими пропозиціями, а також підтверджують дослідження, проведені в [45]. Також сподіваємося, що розроблена методика виявиться достатньо ефективною в практичному застосуванні з будь-яким набором вимірювальних показників.

Проведення розширеного дослідження безпілотних платформ підтверджує необхідність спеціальної підготовки операторів для обслуговування, експлуатації та виконання завдань за призначенням [46, 47].

У роботі запропоновано підхід, що ґрунтується на введенні узагальненого показника продуктивності оператора, який є лінійною функцією часткових різнорідних критеріїв якості з невідомими ваговими коефіцієнтами. Описаний метод є модифікацією методу аналізу ієрархій процесів, заснованого на ідентифікації однотипних показників, ефективність якого підтверджена чисельними прикладами [48]. Розглянутий підхід може бути використаний під час сертифікації оператора після проходження процесу навчання. Наші подальші дослідження ми плануємо спрямувати на розроблення та впровадження програмного забезпечення тренажерного комплексу з оцінювання підготовки операторів БПЛА за наведеною методикою. Запропоновані моделі побудови маршруту з оцінюванням дій оператора доцільно використовувати в середовищах MissionPlanner, ArduPilot.

Висновки до розділу 5

1. Схеми найбільшої пропускної здатності ґрунтуються на способі створення ковзного вікна. Існує пряма залежність між розміром вікна та пропускною здатністю. Що більший розмір вікна, то вища пропускна здатність. Під час порівняння двох схем створення «ковзного вікна» найкращі характеристики має схема вибіркової відмови.

2. Обмін інформацією з групою БПЛА здійснюється по радіоканалу «БПЛА-пункт управління». Рух БПЛА та недосконалість обладнання спричиняє помилки приймання інформації. Усунення неточностей отриманої інформації досягається шляхом повторення пакетів даних і називається управлінням потоком.

3. Отримали подальшого розвитку методи управління потоком, які орієнтовані на повторне оброблення втраченої інформації. Це методи зупинки та очікування, повторення останніх M пакетів і вибіркове відхилення. Відсутність помилок в отриманій інформації оцінюється ARQ на основі «ковзного вікна». У дослідженні в основному використовується показник пропускної здатності. Відрізняється оцінкою каналу завантаження «Контроль точки БПЛА» для визначених методів управління потоком. Структура передбачала обчислення пропускної здатності потоку для системи з фіксованою затримкою та незалежним від часу бездротовим каналом.

4. Набув подальшого розвитку метод аналізу ієрархій процесів, заснований на ідентифікації однотипних показників, шляхом введення узагальненого показника продуктивності оператора, який є лінійною функцією часткових різнорідних критеріїв якості з невідомими ваговими коефіцієнтами, ефективність якого підтверджена чисельними прикладами.

5. Аналіз отриманих цифр дає змогу дійти невтішного висновку, що облік післядії послаблює вимоги до обсягу буфера. У дослідженні наведено загальний підхід до розрахунку показників інформаційного трафіку повітряної інформаційної системи, що складається з n безпілотних літальних апаратів, що виконують завдання моніторингу земного простору на тривалому інтервалі часу. Це дає

можливість за умови часу моніторингу $T \rightarrow \infty$ застосувати для розрахунку систему алгебричних рівнянь станів системи, аналогічно тій, яка використовується під час аналізу безперервних марковських ланцюгів – «схему загибелі та розмноження». Цей підхід справедливий у разі, коли інформаційний потік можна подати пуассонівським, що не завжди є адекватною заміною. Також розглянуто підхід, що ґрунтується на обліку післядії. Водночас початкова схема розрахунку не виконується, а виникає необхідність застосування інших підходів, зокрема заміни експоненціального розподілу інтервалів між подіями на Ерланга 2-го порядку, де тимчасові показники до системи розраховуються беручи до уваги формули Полячека-Хінчина.

Список використаних джерел до розділу 5

1. Wei L., Chen M., Li T. Dynamic event-triggered cooperative formation control for UAVs subject to time-varying disturbances. *IET Control Theory and Applications*. Vol. 14. Is. 17. 2020, pp. 2514–2525. DOI: 10.1049/iet-cta.2020.0342 URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85095864495&doi=10.1049%2fiet-cta.2020.0342&partnerID=40&md5=5ba9739d5231027d843966b2a962d51c>.
2. Qadir Z., Zafar M.H., Moosavi S.K.R., Le K.N., Mahmud M.A.P. Autonomous UAV Path-Planning Optimization Using Metaheuristic Approach for Predisaster Assessment. *IEEE Internet of Things Journal*. Vol. 9. Is. 14. 2022, pp. 12505–12514. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3137331. URL: <https://www.scopus.com/pages/publications/85122067746>.
3. Kwok Y.-K., Ahmad I. Static Scheduling Algorithms for Allocating Directed Task Graphs. *ACM Computing Surveys*, 1999. № 4, pp. 406–471.
4. Sachdeva S., Panwar P. A Review of Multiprocessor Directed Acyclic Graph (DAG) Scheduling Algorithms. *IJCSC*. Vol 6. No 11 Sep–Mar, 2015, pp. 66–72.
5. Liu X., Yu Y., Li F., Durrani T.S. Throughput Maximization for RIS-UAV Relaying Communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Vol. 23. Is. 10. 2022, pp. 19569–19574. DOI: 10.1109/TITS.2022.3161698. URL:

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85127762756&doi=10.1109%2fTITS.2022.3161698&partnerID=40&md5=9b339c5c27267b39842cbd1bbee8fcfa>.

6. Kim T., Qiao D. Energy-Efficient Data Collection for IoT Networks via Cooperative Multi-Hop UAV Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. 69. Is. 11, art. No. 9210011, 2020, pp. 13796–13811. DOI: 10.1109/TVT.2020.3027920. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85096341595&doi=10.1109%2fTVT.2020.3027920&partnerID=40&md5=c3c556619f812dcfc6aeb5046ba1b44f>.

7. Issariyakul T. Channel-quality-based opportunistic scheduling with ARQ in multi-rate wireless networks: modeling and analysis. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006. Vol. 5. № 4, pp. 796–806. DOI: 10.1109/TWC.2006.1611084.

8. Feriani A., Hossain E. Single and Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for AI-Enabled Wireless Networks: A Tutorial. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. Vol. 23. Is. 2, art. No. 9372298, 2021, pp. 1226–1252. DOI: 10.1109/COMST.2021.3063822. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0.85102643196&doi=10.1109%2fCOMST.2021.3063822&partnerID=40&md5=fcee093b56035d3fbe180aecb41dc498>.

9. Bezruk V., Chebotareva D., Jo M., Ivanenko S. “Multicriteria Optimization in Planning of Mobile Communication Networks”, *20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications*. MIKON 2014, June 16–18, Gdansk, Poland, 2014, pp. 633–639.

10. Jensen P.A., Barnes J.W. Network flow programming, N.-Y.: Jonh Wiley & Sons, 1980. 380 p.

11. Stallings W. High-Speed Networks and Internets. Perfomance and Qaulity of Service, N.-J.: Prentice Hall PTR, 2002. 783 p.

12. Korn G.A., Korn T.M. Mathematical handbook, NY: McGraw-Hill Book Company, 1968, 832 p.

13. Кучеров Д. П., Козуб А. М., Іванов Б. П. Інформаційне забезпечення групового польоту БПЛА: матеріали наук-практ. конф. «Перспективи розвитку автоматизованих систем управління військами та геоінформаційних систем», 29

січня 2015 р. Львів: Академія сухопутних військ імені Гетьмана Петра Сагайдачного, 2015. С. 249–251.

14. Козуб А. М. Оцінка пропускну́ї здатності групи безпілотних літальних апаратів при виконанні завдання моніторингу: матеріали наук-практ. конф. «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки та досвід її експлуатації в особливий період», 25 червня 2015 р. Київ: Державний науково-дослідний інститут авіації, 2015. С. 36.

15. Stallings W. Data and Computer Communications. 10th ed. Boston : Pearson, 2014. 912 p.

16. Hillier Frederick S., Lieberman Gerald J. Introduction to Operations Research. McGraw-Hill Higher Education, 2010. 1047 p.

17. Abate J. Simple spectral representations for the M/M/1 queue. *Queueing systems*. № 3. 1988. P. 321–346.

18. Sheldon Ross. A first course in probability. Eighth Edition. Pearson Prentice Hall™ is a trademark of Pearson Education, Inc. 2010. 530 p.

19. Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A. Operator Training for Unmanned Aerial Vehicles Control in 2019 *IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, 22–24 Oct. 2019, Kiev, Ukraine, pp. 1–4.

20. McCarley J. S., Wickens C.D. Human Factors Implications of UAVs in the National Airspace, 2019. DOI [https://doi.org/ 10.1109/APUAVD47061.2019.8943918](https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943918). URL: https://www.researchgate.net/publication/228358350_Human_factors_implications_of_UAVs_in_the_national_airspace, last accessed 2019/03/13.

21. Taylor R. M., “Human Automation Integration for Supervisory Control of UAVs” in *Virtual Media for Military Applications*, RTO-MP-HFM-136. 2006, pp. 12-1–12-10.

22. Chen J. Y. C. “Effects of operator spatial ability on UAV-guided ground navigation” in *5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, 2–5 March 2010, Osaka, Japan, Proceedings. 2010, pp. 139–140,. URL: <https://doi.org/10.1109/HRI.2010.5453227>.

23. Wu J., Wang W., Zhang J., Wang B. “Research of a kind of new UAV training simulator based on equipment simulation” in 2011 *International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, 12–14 Aug., Harbin, China, Proceedings. 2011, pp. 4812–4815. URL: <https://doi.org/10.1109/EMEIT.2011.6024116>.

24. Kozhokhina O. V., Gribov V. M., Blahaia L. V. “Processing statistical data about UAV operator errors”, in *IEEE 3rd International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, 13–15 October, Kyiv, Ukraine, Proceedings, 2015, pp. 124–127. URL: <https://doi.org/10.1109/APUAVD.2015.7346578>.

25. Rodriguez-Fernandez V., Menendez H.D., Camacho D. Automatic profile generation for UAV operators using a simulation-based training environment. *Lect. Notes Artif. Int.* 5 (1), 2016, pp. 37–46. URL: <https://doi.org/10.1007/s13748-015-0072-y>.

26. Yu Z., Zhang Y., Jiang B., Fu J., Jin Y. A review on fault-tolerant cooperative control of multiple unmanned aerial vehicles. *Chinese Journal of Aeronautics*. Vol. 35. No 1. 2022, pp. 1–18. DOI: 10.1016/j.cja.2021.04.022 URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85108994643&doi=10.1016%2fj.cja.2021.04.022&partnerID=40&md5=430562086a5fc8d5a896e0dd4e793c25>.

27. Gunchenko Y. A., Shvorov S. A., Rudnichenko N. D., Boyko V. D. “Methodical complex of accelerated training for operators of unmanned aerial vehicles” in 2016 *4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, 18-20 Oct., Kiev, Ukraine, 2016, pp. 130–133. URL: <https://doi.org/10.1109/MSNMC.2016.7783124>.

28. Zlepko S. M., Koval L. G., Shtofel D. Kh., Homolinskyi V. O., Palamarchuk M. I. “Peculiarities of Psycho-Physiological Selection of Operators for Unmanned Aviation Systems” in 2020 *IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 25–29 Feb., Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 628–631. URL: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235508>.

29. Dagle J. "Partial panel" operator training: advanced simulator training to enhance situational awareness in off-normal situations in 2006 *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 18–22 June, Montreal, Que., Canada, 2006, pp. 1–2. URL: <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709229>.

30. Hong-bin D., Tao-li G., Xiao-li D. A System Dynamics simulation analysis of the Influencing Factors of coalmine special operators' competency by training in 2nd *IEEE International Conference on Information Management and Engineering*, 16–18 April, Chengdu, China, 2010, pp. 367–370, URL: <https://doi.org/10.1109/ICIME.2010.5477580>.

31. Haraguchi H., Kaihara T., Fujii N., Kokuryo D. A study of designing for the operator training under an order change in cell manufacturing system in 55th *Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, 20–23 Sept., Tsukuba, Japan, 2016, pp. 802–806. URL: <https://doi.org/10.1109/SICE.2016.7749216>.

32. Haraguchi H. A Study on Operator Allocation Method Considering the Productivity and the Training Effect in Labor-Intensive Manufacturing System in 2019 *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 15–18 Dec., Macao, 2019, pp. 1236–1239. URL: <https://doi.org/10.1109/IEEM44572.2019.8978613>.

33. Coluzzi C., Contu M., Pecoraro G., Orlandi S., et al. Real time operators training: Terna experience in implementing the Commission Regulation (EU) 2017/1485. *International Annual Conference (AEIT)*, 18–20 Sept. 2019, Florence, Italy, 2019, pp. 1–5. URL: <https://doi.org/10.23919/AEIT.2019.8893413>.

34. Ayaz H., Shewokis P. A., Bunce S., Izzetoglu K., et al. "Optical brain monitoring for operator training and mental workload assessment", *NeuroImage*. 59, 2012, pp. 36–47. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.06.023>.

35. Selivanova K. G., Ignashchuk O. V., Koval L. G. et al. Computer-aided system for interactive psychomotor testing. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, Proc. SPIE. Vol. 10445. 2017. 104453B. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2280815>.

36. Bachynskiy M. V., Azarkhov O. Yu., Shtofel D. Kh. et al. System and algorithm for evaluation of human auditory analyzer state. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, Proc. SPIE. Vol. 10445, 2017. [https://doi.org/ 10.1117/12.2280738](https://doi.org/10.1117/12.2280738).

37. Zemzem Wiem, Hosni Ines. A New Distributed Reinforcement Learning Approach for Multiagent Cooperation Using Team-mate Modeling and Joint Action Generalization. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J. (ASTESJ)*. Vol. 5. No 2. 2020, pp. 1–12. URL: <https://doi.org/10.25046/aj050201>.

38. Kuchеров D. P., Kozub A. M., Mathematical model of UAV as agent of multi-agent system in *Dependable Systems, Services, and Technologies (DESSERT-2018)*, May 24–27, Kyiv, Ukraine, Proceedings, 2018, pp. 358–362. URL: <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409156>.

39. Kuchеров D., Sushchenko O., Rasstrygin A., Zhdanov S., Kozub A. Synthesis of the switching control law for a quadrotor autopilot. *Int. J. of Eng. and Tech. (UAE)*. Vol.7. No 4. 2018, pp. 3065–3069. URL: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.16368>.

40. Kuchеров D. P., Kozub A. M., Kostyna O. N. Group of UAVs Moving on Smooth Control Law with Fixed Obstacles. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, 2 (3), pp. 1034–1041, 2017. URL: <https://doi.org/10.25046/aj0203131>.

41. Libet B. Mind time: The temporal factor in consciousness, Perspectives in Cognitive Neuroscience, Harvard University Press, 2004.

42. Dektak stylus capabilities. https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/StylusProfilometry/ApplicationNotes/AN526-Dektak_Stylus_Capabilities_How_to_Choose_the_Corre.pdf.

43. Morais Caroline, Yung Ka Lai, Moura Raphael, et al. Identification of human errors and influencing factors: A machine learning approach. *Safety Science*. Vol.146. Feb. 2022. Page 105528. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105528>.

44. Saaty T. L. “Relative Measurement and its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors the Analytic Hierarchy/Network Process” *Rev. R. Acad. Cien. Serie A*.

Mat. (RACSAM), Vol. 102. Is. 2. 2008, pp. 251–318. URL: <http://www.rac.es/ficheros/doc/00576.PDF>.

45. Avetistova A. A. Psychological features of players in computer games. *Psychology. J of the Higher School of Econ.* Vol. 8. No 4. 2011, pp. 35–58.

46. Kuchеров Dmytro, Sushchenko Olga, Kozub Andrey, Petrov Anton. Assessment operator-pilot training in conflict situation. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. vol. 2588, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.55056/ceur-ws.org/Vol-2588/paper1.pdf> (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

47. Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A. Operator Training for Unmanned Aerial Vehicles Control. 2019 *IEEE 5th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development*, APUAVD 2019. Proceedings, 2019, pp. 31–34, 8943918. DOI: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943918.

48. Assessing the operator's readiness to perform tasks of controlling by the unmanned aerial platforms / Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A., Nakonechnyi V. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTESJ)*. Vol. 5. No 4. 2020, pp. 457–462.

РОЗДІЛ 6

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПОБУДОВИ БАГАТОПОЗИЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БЕЗПЛОТНИХ АВАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ

6.1. Архітектура системи керування

Внутрішня архітектура системи керування елемента групи може бути побудована як і в [1] на основі поведінкових реакцій (Behavior-Based Architecture), яка має подання структури керувального алгоритму багатоканальної системи керування у вигляді сукупності щодо простих, і по можливості, мінімально зв'язаних один з одним обчислювальних модулів, які формують поведінкові реакції за допомогою систем керування високого, середнього та низького рівня. Кожна поведінкова реакція відповідає за розв'язок конкретного управлінського завдання. Архітектуру системи керування з використанням трирівневої системи керування подано на рис. 6.1.

Архітектура системи керування такого виду фактично являє собою опис структури інформаційних зв'язків між різними контурами керування (поведінковими реакціями), визначається на етапі проєктування і жорстко фіксована. Кожна реакція відповідає за конкретне завдання керування. Ці завдання виконуються паралельно й мають своєю метою забезпечити виконання завдання, поставленого перед елементом групи. Підсистеми керування формують поведінкові реакції, які структуруються введенням багаторівневої системи. Рівні класифікуються швидкостями виконання поведінкових реакцій. Відповідно до такої побудови системи різні поведінкові реакції можуть використовувати показання з самих датчиків і, відповідно, відхилення, які являють собою різницю між поставленою для поведінкової реакції метою й реальним станом об'єкта керування, працюють паралельно по кожному з каналів. Поточний стан об'єкта керування оцінюється за показниками датчиків, які можуть використовуватися поведінковими реакціями різних рівнів. Цілі поведінкових реакцій подають у вигляді опису необхідних траєкторій системи в просторі станів.

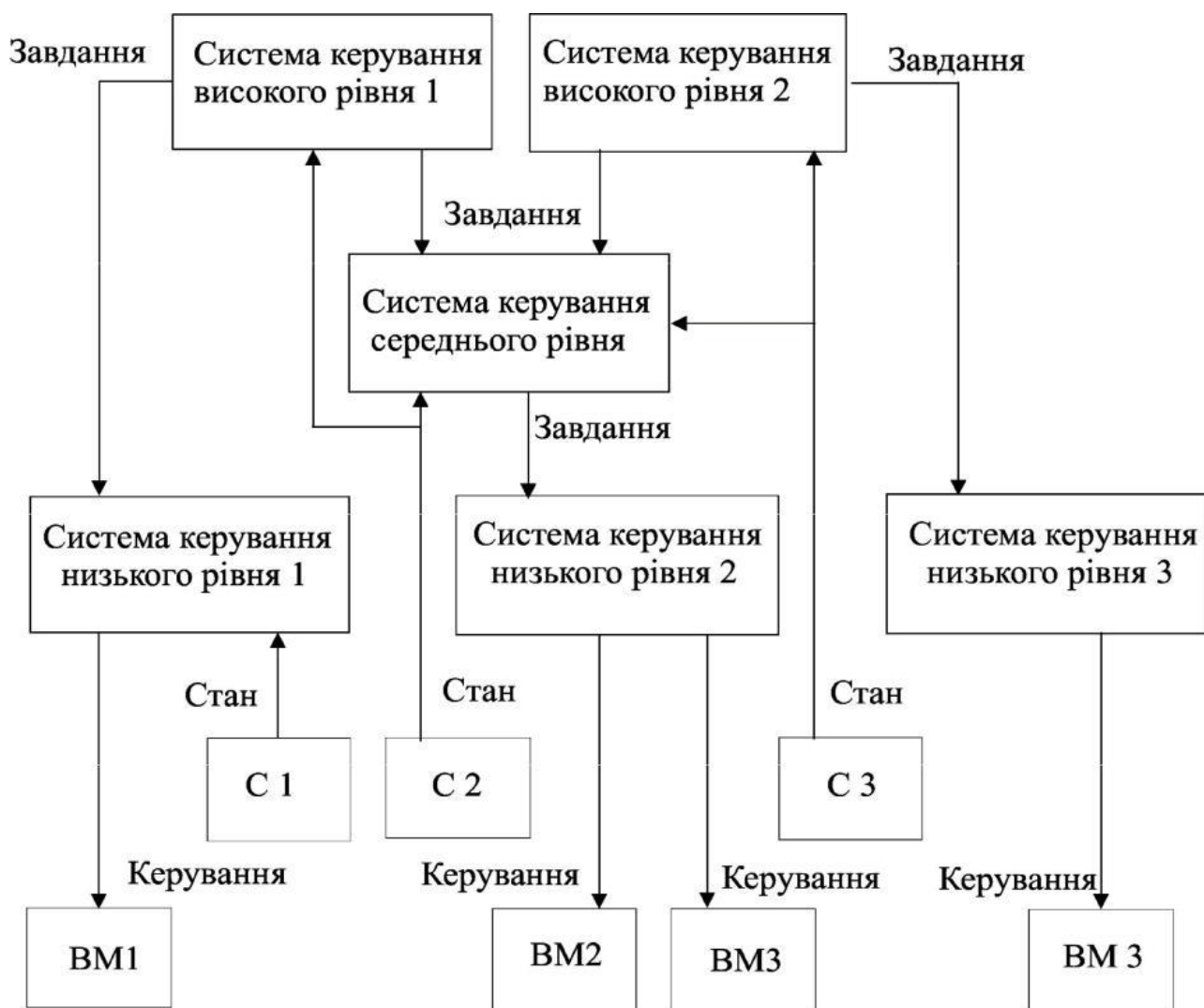


Рис. 6.1. Реалізація системи керування

На вищому рівні вирішуються довгострокові завдання, що виникають перед БПЛА: рух за заданою траєкторією, забезпечення необхідної орієнтації в просторі під час проходження за заданою траєкторією й т.д.

Ці завдання формуються на основі команд, що надходять із центрального пункту керування або оператора польоту, а також на основі поточних показань датчиків (стан літального апарата).

Середній рівень системи керування забезпечує необхідні «модулі» для виконання високорівневих команд, які призначені для виконання низки

«елементарних» маневрів, що виконує БПЛА: перехід на нову необхідну висоту, забезпечення необхідної просторової орієнтації й т.д.

За видавання команд виконавчим механізмам системи керування відповідальні низькорівневі поведінкові реакції. Низькорівневі поведінкові реакції відповідальні за контури керування, що вимагають «швидких» реакцій, які й називаються рівнем рефлексів, тому що цей контур керування відповідає за стабілізацію БПЛА у фізичному просторі, і від швидкості реакцій на виникаючі зовнішні збурювання.

6.2. Ефективність групових польотів безпілотних літальних апаратів

Розроблення безпілотних авіаційних комплексів (БАК) на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) здійснюється нині фактично всіма індустріально розвиненими країнами світу. Застосування БАК ефективно як у завданнях розвідки, так і в цивільній авіації, а саме під час боротьби з наслідками надзвичайних ситуацій і стихійними лихами, а також у сільському господарстві, аерофотозніманні, ретрансляції зв'язку тощо. Основним напрямом розроблення БАК дотепер вважалася багатозадачність (багатоцільове використання), наприклад, ведення контролю стану й охорони лісів і нерестовищ, льодової розвідки й ін. Однак через обсяг запланованих завдань, покладених на окремий літальний апарат, вони не можуть бути виконані в обмежений час і тому для таких цілей доцільне групове застосування БПЛА. Низка питань колективної (групової) дії автономних повітряних об'єктів розглядається в [2]. Відзначені додаткові корисні властивості, якими володіє група БПЛА порівняно з використанням одного БПЛА [2].

Більшість робіт, у яких вивчаються групові дії БПЛА, орієнтуються на основну монографію [3], у якій з використанням підходів класичної теорії керування розглядаються питання керування групою, організованої у вигляді «строю», що припускає роздільне подання руху окремого об'єкта групи математичною моделлю для бічного й поздовжнього руху центру мас. Водночас

об'єктивно виникає завдання розроблення деякого «оптимального» маршруту для групи і її окремих елементів.

Низка дослідницьких робіт присвячено виконанню завдання планування маршруту як одного БПЛА, так і всієї групи БПЛА. Ці роботи містять методологію побудови діаграм Воронова [2], побудову маршруту БПЛА за опорними точками [3]. Основна мета побудови маршруту впорядкованого руху ЛА спрямована на забезпечення безпеки руху групи, яка забезпечується підтримкою обраних дистанції й швидкості руху окремих елементів групи [4–6].

У роботах [7–10] досліджено багатокомпонентну групу, що складається із БПЛА вертолітного й літакового типів, що має складний характер інформаційного обміну унаслідок застосування каналів керування польотом, операторського каналу, а також взаємодії автономних елементів системи між собою. В [11, 12] показано недоцільність застосування класичної теорії керування для таких завдань. Труднощі, з якими стикаються розробники систем керування стосовно до групи БПЛА різних типів описані в [13, 14].

Для подолання труднощів застосування класичної теорії керування використано ідею застосування системи керування на основі поведінкових реакцій з використанням нейронних мереж, яка належить Бруксу [8] та групі Montgomery [9].

Багаторівнева система керування, розроблена Montgomery, припускає, що на вищому рівні виконуються довгострокові завдання, що виникають перед БПЛА: рух за заданою траєкторією, забезпечення необхідної орієнтації в просторі під час проходження за заданою траєкторією і т.ін. Середній рівень системи керування забезпечує необхідні «модулі» для виконання високорівневих команд, які забезпечують ряд «елементарних» маневрів, виконуваних вертольотом: перехід на нову необхідну висоту, забезпечення необхідної просторової орієнтації гелікоптера й т.д. Нижній рівень керування відповідає за забезпечення виживання безпілотної машини шляхом дуже швидкого реагування на зовнішні впливи в разі втримання гелікоптера в режимі зависання.

Описана структура організації групи БПЛА виявила такі недоліки: складність розподілу завдань між оператором польоту, і елементами групи БПЛА; недостатня оперативність під час виконання завдань патрулювання, пошуку й ретрансляції в запропонованій зоні; необхідність опису зони, що охороняється опорними точками (координатами GPS); обмеженість тривалості маршруту групи БПЛА; автоматичний перерозподіл (дублювання) завдань усередині групи БПЛА з появою надзвичайної ситуації в межах зони патрулювання; необхідність збільшення тривалості патрулювання під час дії групи БПЛА.

Метою роботи є дослідження структур системи моніторингу за допомогою групи БПЛА, що забезпечує контроль обстановки в зоні патрулювання; виявлення й локалізацію надзвичайної ситуації, як-от, наприклад, лісова пожежа; видавання інформації на пункт керування шляхом патрулювання зони групою БПЛА; аналіз ефективності топології групи БПЛА; розроблення бази даних БПЛА для системи моніторингу.

6.2.1. Постановка завдання

Задана область довільної форми площею S , віддалена від пункту керування на дальність R . Область характеризується тим, що в ній можливе виникнення надзвичайних ситуацій, на які потрібно вчасно реагувати з метою зменшення завдання збитків. До таких неприпустимих ситуацій належить, наприклад, лісова пожежа, повінь та інші стихійні лиха. Область контролюється групою БПЛА, основне завдання якої – моніторинг стану зони патрулювання, своєчасне виявлення неприпустимої ситуації, визначення її характеристик, попереднє оцінювання завданого збитку.

Вважається, що кожний елемент групи БПЛА у процесі виконання завдання здатний змінити маршрут руху, зону патрулювання, передавати інформацію про результати спостереження, реагувати на сигнали пункту керування. Зрозуміло, що система керування кожного елемента групи для виконання поставленого завдання повинна мати у своєму складі підсистеми приймання-передавання інформації,

керування рухом, моніторингу місцевості й розпізнавання неприпустимої ситуації. Як показники такої системи БПЛА вибираються показники якості одержуваної інформації: затримка інформації T , втрата L , повнота V і вірогідність P .

Під час функціонування система моніторингу повинна забезпечити задану ефективність $E_{\text{доп}}$ шляхом задоволення критерію:

$$E = \min_{T,L} \max_{V,P} I(T, L, V, P) \leq E_{\text{доп}}, \quad (6.1)$$

де $E()$ – деяка функція, що характеризує інформаційну здатність системи.

Отже, ставиться завдання розроблення структури системи моніторингу, що забезпечує контроль обстановки в зоні патрулювання, виявлення й локалізацію неприпустимої ситуації, видавання інформації на пункт керування шляхом патрулювання зони, виконуваною групою БПЛА й визначення чинників, що впливають на ефективність (6.1).

6.2.2. Типові варіанти структур

Зона патрулювання площиною S за для виконання завдання розбивається на n -підзон приблизно рівної площі, тобто

$$S_i = S/n, \quad (6.2)$$

де, $i = \overline{1, n}$, n – кількість БПЛА в групі.

У разі такої організації кожний елемент групи виконує ті самі функції, але в різних підзонах S_i . Вважаємо, що споживачем інформації є пункт, звідки здійснюється старт БПЛА. Тоді функції пункту керування можуть бути розширені, і складатися з розподілу зон між елементами групи, визначення маршруту руху окремого елемента групи, видавання команд керування, зв'язку із зовнішніми системами.

Функції елемента групи полягають у такому: проходження по маршруту, орієнтація в просторі, фіксація неприпустимої події, видавання повідомлень про результати моніторингу.

Спрощений вид структури показано на рис. 6.2.

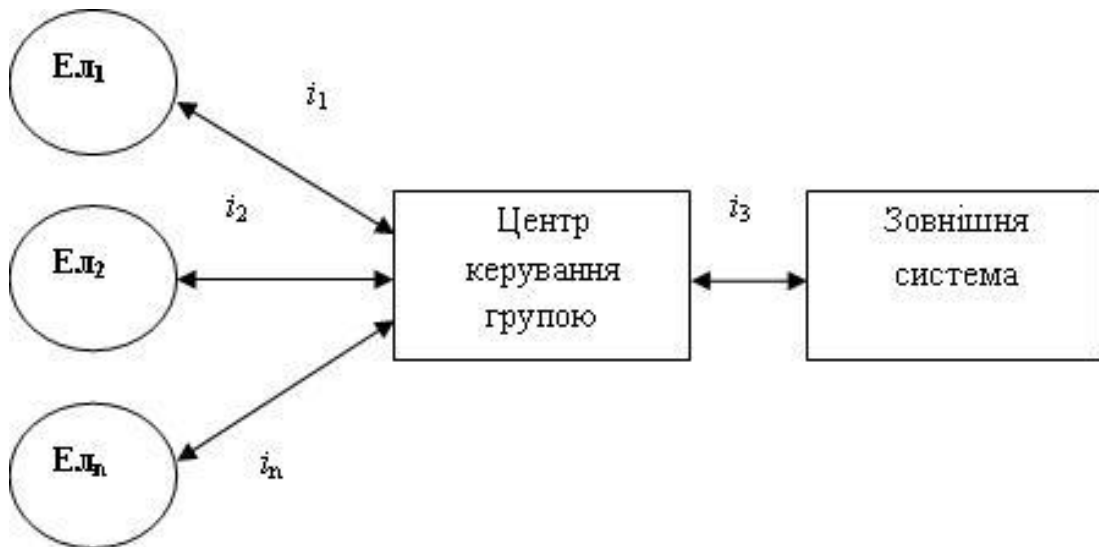


Рис. 6.2. Спрощена структура системи із групою БПЛА

Структура на рис. 6.2 має мережеву організацію із централізованим керуванням. Водночас від елементів групи надходить по каналах зв'язку на пункт керування оперативна інформація $i_1, \dots, i_n$. Пункт керування має додатковий канал зв'язку із зовнішніми системами, який видає інформацію i_3 для організації дій додаткових засобів.

Зважаючи на мережевий характер структури можливо припустити також, що група БПЛА матиме складнішу – деревоподібну структуру, у якій елементи групи $Ел_1, Ел_2, \dots, Ел_n$ замикаються на кореневий елемент $Ел_0$, як показано на рис. 6.3.

У цьому разі значна частина завдань оперативного керування групою покладається на елемент $Ел_0$, тобто в такий спосіб може бути розвантажений центр керування групою, який виконуватиме тільки підготовчі завдання польоту й трансляцію інформації i_0 на зовнішні системи.

Слід зазначити, що структури, подані на рис. 6.2, 6.3, практично ідентичні, доцільність застосування тієї або іншої структури визначатиметься тільки характеристиками відстані каналу зв'язку, кількісним складом групи та живучості групи. Очевидно, що показники відстані структури з деревоподібною структурою вище, ніж у структури, поданій на рис.6.2.

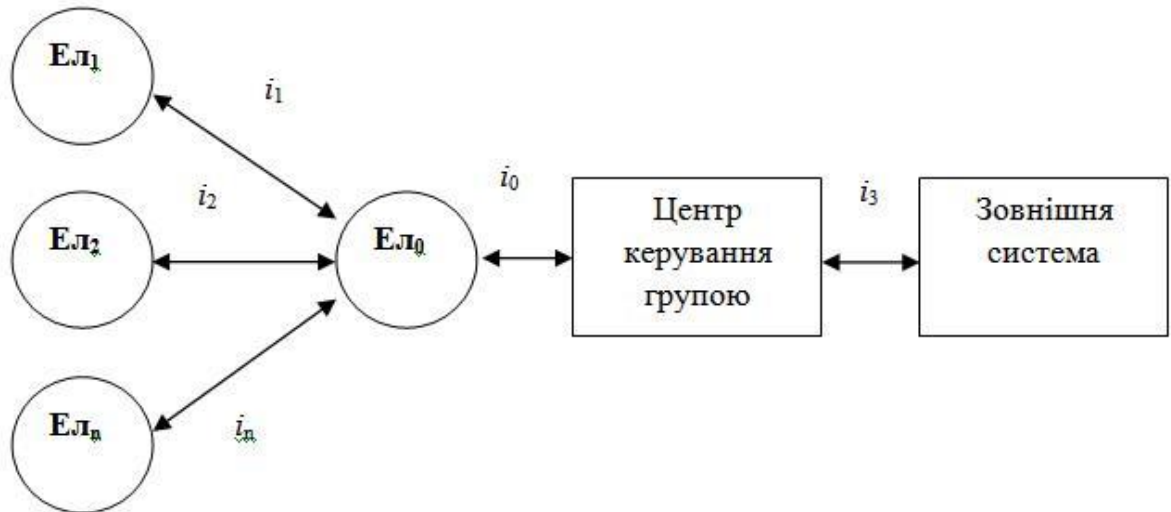


Рис. 6.3. Деревоподібна структура групи БПЛА

Однак керування кількісним складом краще в структурі, показаній на рис. 6.2, завдяки вилученню проміжного елемента керування. Близькість структур рис. 6.2 і 6.3 дає змогу зробити висновок про застосовність апарата нейронних мереж до визначення сигналу i_3 (рис. 6.2), i_0 (рис. 6.3), тобто вихідний сигнал мережі можна подати у вигляді

$$i_0 = \begin{cases} 1, \text{ якщо } I(E_{\text{л}}) > T, \\ 0, \text{ якщо } I(E_{\text{л}}) \leq T, \end{cases} \quad (6.3)$$

де $I(E_{\text{л}})$ – так звана активаційна (вирішальна) функція, сигмаїдального виду, що дозволяє класифікувати неприпустимі ситуації; T – граничне значення для їх визначення.

Математично активаційна функція може бути записана у вигляді

$$I(E_{\text{л}}) = \frac{1}{1 + \exp(-\sum_{i=1}^n k_i E_{\text{л}i})}, \quad (6.4)$$

де k_i – вагові коефіцієнти.

Слід зазначити про доцільність застосування ще однієї структури, яка також впливає з рис. 6.2 та 6.3, якщо припустити можливість обміну інформацією між елементами групи (рис. 6.4). У цьому разі структура рис. 6.3 здобуває властивості мультиагентної системи [10], роботу якої можна звести до виконання двох основних завдань:

- визначення точного місцезнаходження групи БПЛА і ступеня виконання завдання на основі загальних даних групи;
- визначення кращого сценарію для кожного агента для виконання завдання групою.

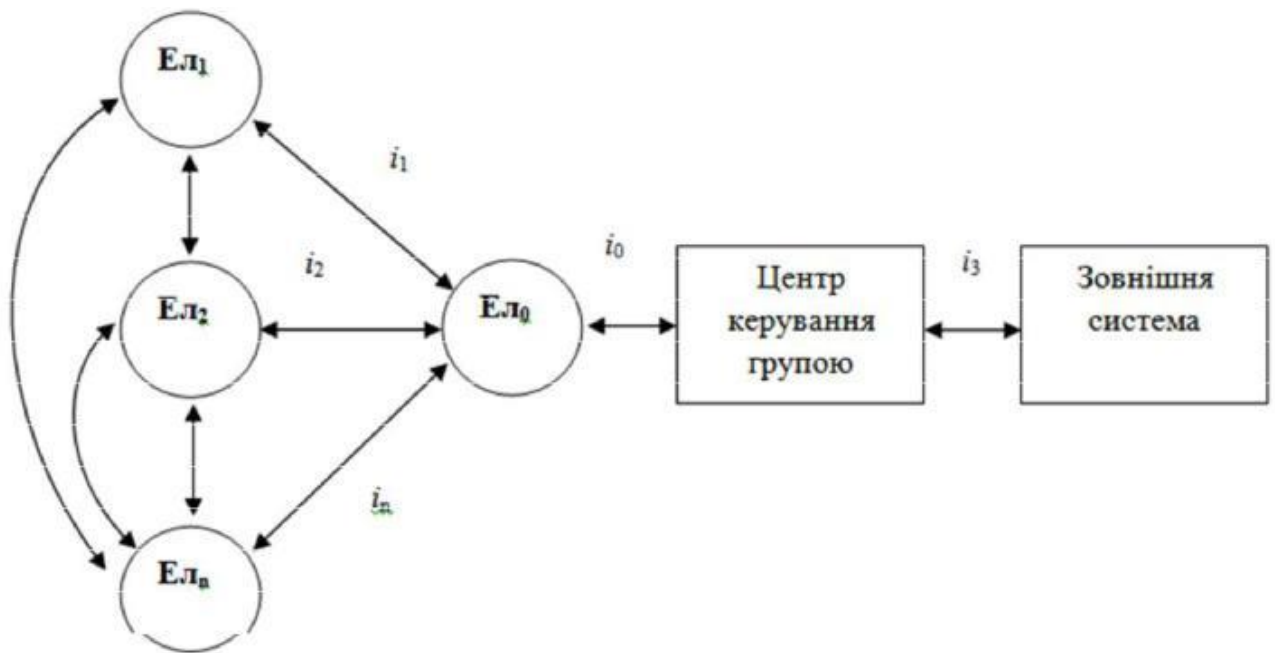


Рис. 6.4. Структура мультиагентної групи БПЛА

Розглянуті структури мають мережеву архітектуру, їх застосування обґрунтовується важливістю розв’язуваних завдань. Найперспективнішою серед розглянутих вважається структура мультиагентної групи БПЛА.

6.2.3. Інформативність групи

Аналіз функціонування системи (див. рис. 6.2, 6.3) дає змогу виділити основні чинники, що визначають критерій (6.4).

Затримки інформації T_z (с) визначаються часовими затримками через необхідність руху за маршрутом до зони патрулювання, через особливості передавання повідомлень та необхідність прийняття рішень. Вводимо позначення $T_{дв}$, $T_{пе}$, $T_{пр}$, тоді вираз загальної інформаційної затримки набуває вигляду

$$T = T_{дв} + T_{пе} + T_{пр}. \quad (6.5)$$

Найбільший внесок у вираз (6.5) становить $T_{дв}$, під час проведення попередніх розрахунків складовими $T_{пе}$ й $T_{пр}$ можна знехтувати, тобто вважати, що $T_z \approx T_{дв}$.

Мінімізацію затримки слід робити шляхом оптимізації маршруту руху.

Кількість інформації I (вимірюється в бітах) визначається бінарною логарифмічною функцією

$$I = \log_2(1/P_k), \quad (6.6)$$

де P_k – імовірність появи повідомлення k , величина P_k набуває значення від 0 до 1.

Можливість вимірювання кількості інформації, яка може бути передана (у біт/с) через який-небудь канал за наявності сигналу певного рівня S і шуму N є важливим аспектом терміна «інформація». Для виміру її кількості використовується теорема Шеннона-Хартлі [15]:

$$C = B \log_2(1 + S/N), \quad (6.7)$$

де B – смуга пропускання каналу, Гц.

Втрати інформації L (дБ) у тракті проходження інформації розрізнятимемо на апаратні $L_{\text{ап}}$, пов'язані з одержанням інформації, втрати, зв'язані із середовищем поширення $L_{\text{ср}}$, втрати пов'язані з обробленням інформації $L_{\text{об}}$.

Тоді загальний вираз інформаційних втрат у системі має вигляд

$$L = L_{\text{ап}} + L_{\text{ср}} + L_{\text{об}} . \quad (6.8)$$

Мінімізація складових в виразі (6.8) забезпечується з огляду на досвід застосування сучасних обчислювальних засобів і відповідного методичного апарату.

Повноту інформації V слід визначати кількістю переданих повідомлень V_i від окремих елементів мережі

$$V = \sum_{i=1}^n V_i . \quad (6.9)$$

Значення V_i у формулі (6.9) визначається типом інформації й застосовуваною апаратурою. Сучасні системи зв'язку дають змогу забезпечити цифровий потік 100 МБ/с та більше, що допомагає будувати повідомлення у вигляді кадра з метою подальшого виконання завдання моніторингу й приймання рішень на його основі.

Вірогідність переданої інформації P_i визначається методом одержання інформації й імовірністю правильності переданого повідомлення p_i окремого джерела

$$P_i = 1 - (1 - p_i)^m , \quad (6.10)$$

де m – число підтверджень переданого повідомлення.

Окрім чинників, що впливають на інформативність роботи групового польоту БПЛА, визначено основні показники ефективності топології багатокомпонентних груп БПЛА, як-от надійність керування, структурна

компактність, ступінь централізованості, живучість групи, за допомогою відомих методів аналізу комп'ютерних мереж в інформаційних технологіях.

Окремі показники інформативності одиничних і групових польотів БПЛА, ефективності різноманітних топологій БПЛА, характеристики сучасних БПЛА відповідно до розробленої класифікації цивільних і військових БПЛА [16], а також нормативна база БПЛА увійшли в довідкову базу даних «Інформаційно-довідкова система безпілотних літальних апаратів».

Отже, у завданнях створення систем керування груповою поведінкою БПЛА доцільно орієнтуватися на мережеву основу. Розроблення таких БАК слугує генератором низки прикладних завдань, виконання яких опирається на сучасні досягнення в області побудови інформаційних систем [17].

Запропонований підхід до побудови системи керування значною мірою допоможе усунути недоліки наявних технічних розв'язків. Подальші дослідження слід спрямувати на виконання практичних завдань реалізації групового управління під час керування БПЛА, що приводить до підвищення ефективності використання БПЛА, а саме:

- можливість коригування плану та оптимізації маршруту польоту, ґрунтуючись на вже отриманих даних з інших БПЛА;
- збільшення вірогідності успішності виконання завдання;
- значний виграш у часі;
- можливість одночасного обстеження території та збільшення площі одночасного моніторингу;
- можливість постановки різних завдань для багатокomпонентних учасників групи БПЛА зважаючи на ефективність топології груп.

Інформаційний обмін між БПЛА слід здійснювати в пакетному режимі з використанням механізму адаптованого передавання даних, заснованому на механізмі ARQ. Запропоновані моделі побудови маршруту з оцінюванням дій оператора доцільно використовувати в середовищах MissionPlanner, ArduPilot.

Структура методології синтезу управління баґапозиційною системою автономних повітряних об'єктів описана у розділах 1–6 та наведена рис. 6.5.

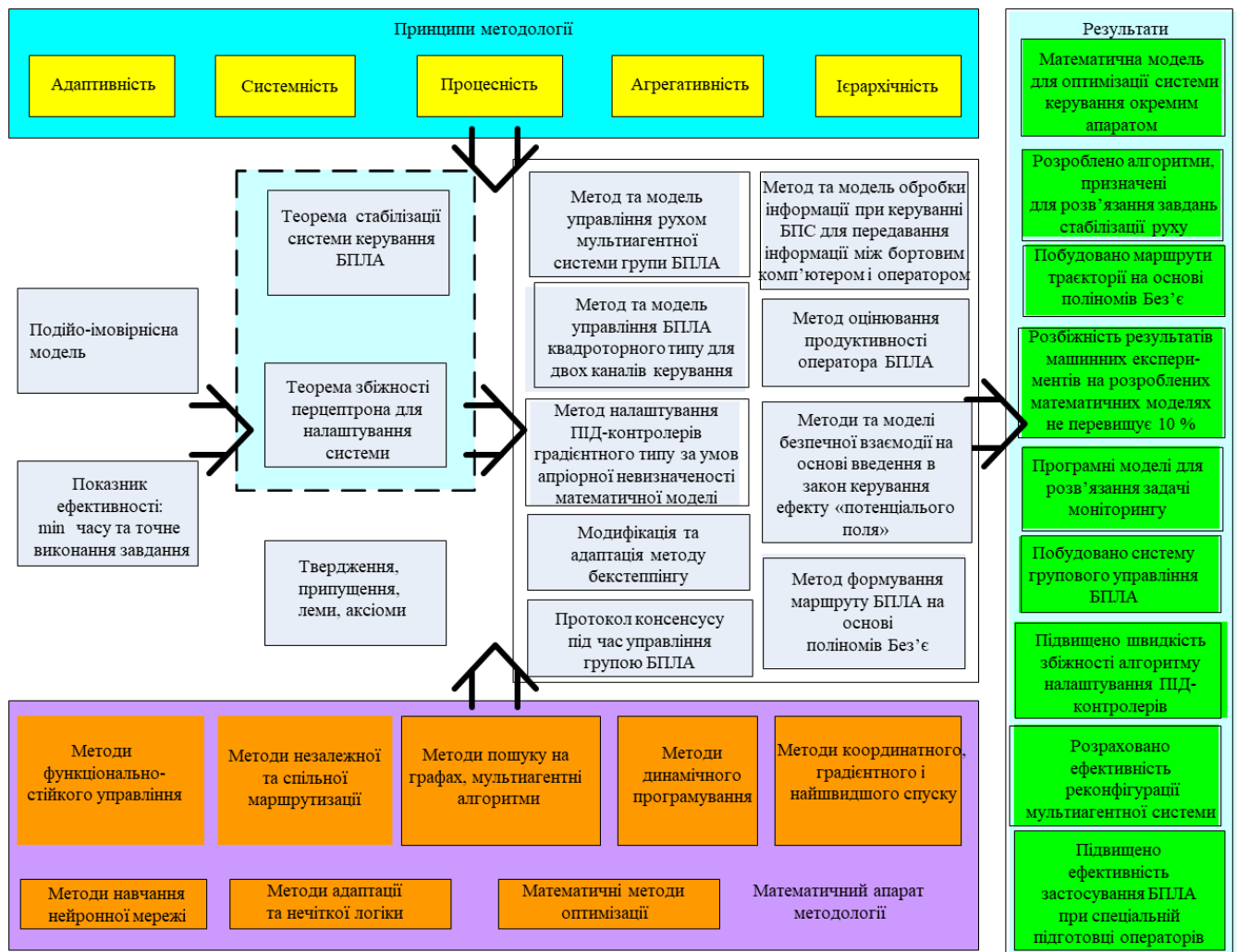


Рис. 6.5. Структура методології синтезу управління багапозиційною системою автономних повітряних об'єктів

6.3. Застосування БПЛА в сільському (лісовому) господарстві

6.3.1. Технології виконання авіаційних робіт безпілотними літальними апаратами

У сучасних умовах рівень розвитку безпілотних авіаційних технологій у світі дає змогу чітко оцінити можливості безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різних класів. Напрямок розвитку БПЛА йде від «універсальності» у бік «спеціалізації» безпілотних апаратів і самих комплексів на «уніфікованих» платформах управління, тобто комплекси, в перспективі, створюватимуться винятково під цільові вимоги замовника. Водночас «уніфікація» платформи управління дасть

змогу формувати один комплекс з набором апаратів різного класу і типу. Цей підхід допомагає знизити вартість як самого комплексу, так і питомі витрати в період його експлуатації завдяки оптимізації виконання польотів шляхом вибору типу апаратів і корисного навантаження під конкретні завдання.

Зважаючи на широкий спектр БПЛА, доцільно їх класифікувати за набором ключових характеристик.

Нині в Україні поки не сформована класифікація БПЛА цивільного призначення, тому пропонуємо таку умовну класифікацію (наприклад, табл.6.1):

мікроклас – для роботи в ближній зоні;

малий клас – для роботи на середньому видаленні;

середній клас – для роботи на видаленні до 100 км;

великий клас – для роботи на видаленні понад 100 км.

Умовно для запропонованих класів можна виокреслити три типи літальних апаратів: літак, гелікоптер, багатовісний гелікоптер – «мультикоптер».

У зазначених класах домінує літаковий тип БПЛА (рис. 6.6), як найпростіший у виготовленні й експлуатації. У мікро- і малому класі світовими виробниками пропонується значний вибір комплексів. У середньому класі перспективні також вітчизняні розробки, що знаходяться на фінальній стадії доведення.

Таблиця 6.1 – Класифікація БПЛА

Клас	Рівень застосування	Радіус	Час польоту, год	Робочий діапазон висот, м	Швидкість, км/год	Смуга захвату, км	Макс. розрізнення, м/пікс	Ціна знімання інформації, дол. США/км ²
Клас I	мікро, злітна маса < 4 кг	5–10 км	до 1,5	100–3000	60–120	0,07	0,3–0,5	180–300
	малі, 4 кг < злітна маса < 50 кг	> 10 км < 50 км	>2,0 <7,0	100–3600	60–120	0,12	до 3,0	
Клас II	Середні >50 кг < 600 кг	> 50 км < 100 км	>8,0 < 12,0	100–4500	150–200	0,7	до 4,0	140–150
Клас III	Великі > 600 кг	> 100 км	> 12,0 < 24,0	100–12000	150–400	1,5 – 2,4	0,3–2,4	28–50

Примітка *) Робочий діапазон для оглядового знімання пожеж – 600–800 м. Детальний огляд пожеж – 200–400 м. Рекомендовано робити огляд 2–3 рази на день.

У великому класі, готові до експлуатації в українських комплексах, з'явилися тільки у 2024 р. Для проведення оцінки порівнянь та перспектив може бути використаний досвід застосування БПЛА різних класів іноземного виробництва.



Рис. 6.6. Літаковий тип БПЛА

Безпілотні вертолітні типи репрезентовані у всіх класах. Як правило, вартість вертолітного БПЛА перевищує літак аналогічного класу в 2–4 рази і має велику складність експлуатації. За таких умов літак значно перевершує вертоліт за основними робочими характеристиками. Перевагу гелікоптера може бути реалізовано у двох напрямках:

- можливість зависання на одному місці і детального огляду вибраного об'єкта з близької відстані;
- використання складного спеціалізованого цільового навантаження в умовах тривалої експлуатації з обмежених майданчиків (наприклад, палуба корабля).

У лісовому господарстві, де часто домінує поєднання вимог дальності, забезпечення заданої продуктивності під час роботи з площинними об'єктами, безперервності спостереження, прийнятною собівартістю робіт питання ефективності вертолітних БПЛА є неоднозначним. Тому експлуатація безпілотних вертольотів у сучасних умовах доцільна, насамперед, у галузях цивільної оборони і надзвичайних ситуаціях, військовому застосуванні, забезпеченні морської діяльності тощо.

Результати моделювання показали наступні залежності застосування групи БПЛА при обстеженні повністю всієї території для пошуку точок інтересу, які

являють собою об'єкти ураження, вогнища, завали, тощо, на території загальною площею S (рис. 6.7–6.9) [18].

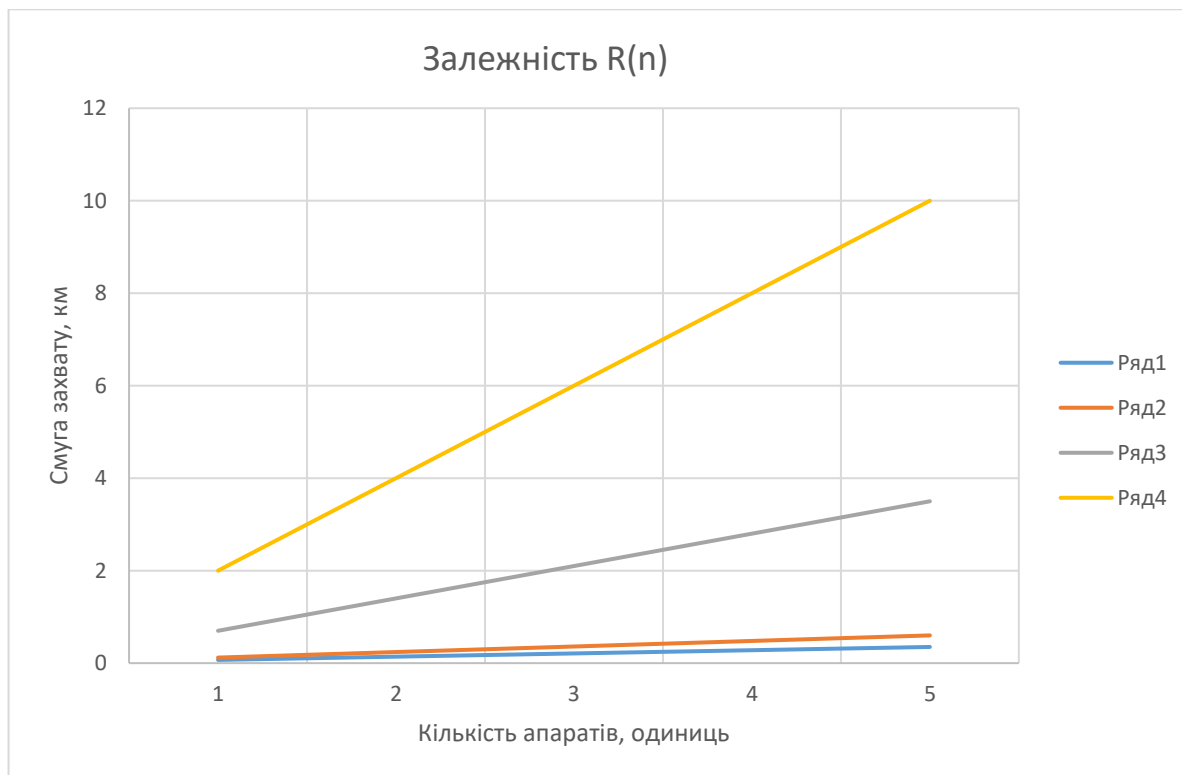


Рис. 6.7. Залежність обстеження території від смуги захопту та кількості БПЛА

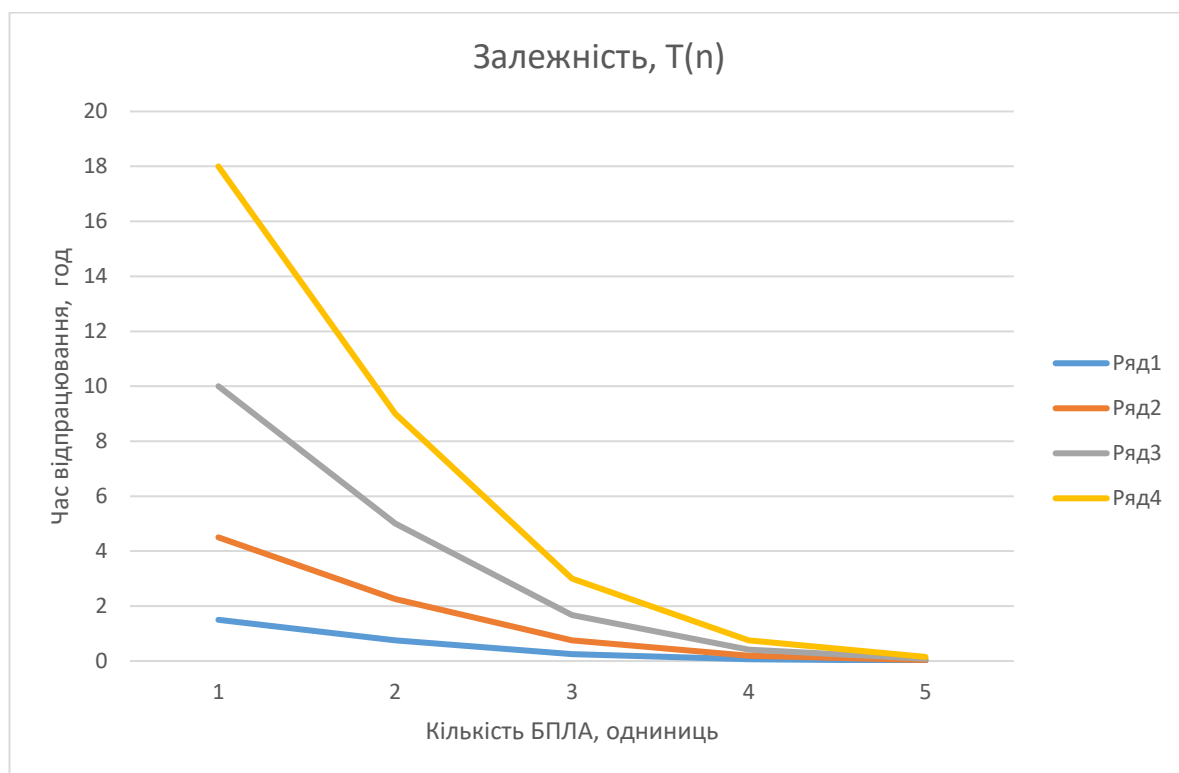


Рис. 6.8. Залежність обстеження території від часу та кількості БПЛА

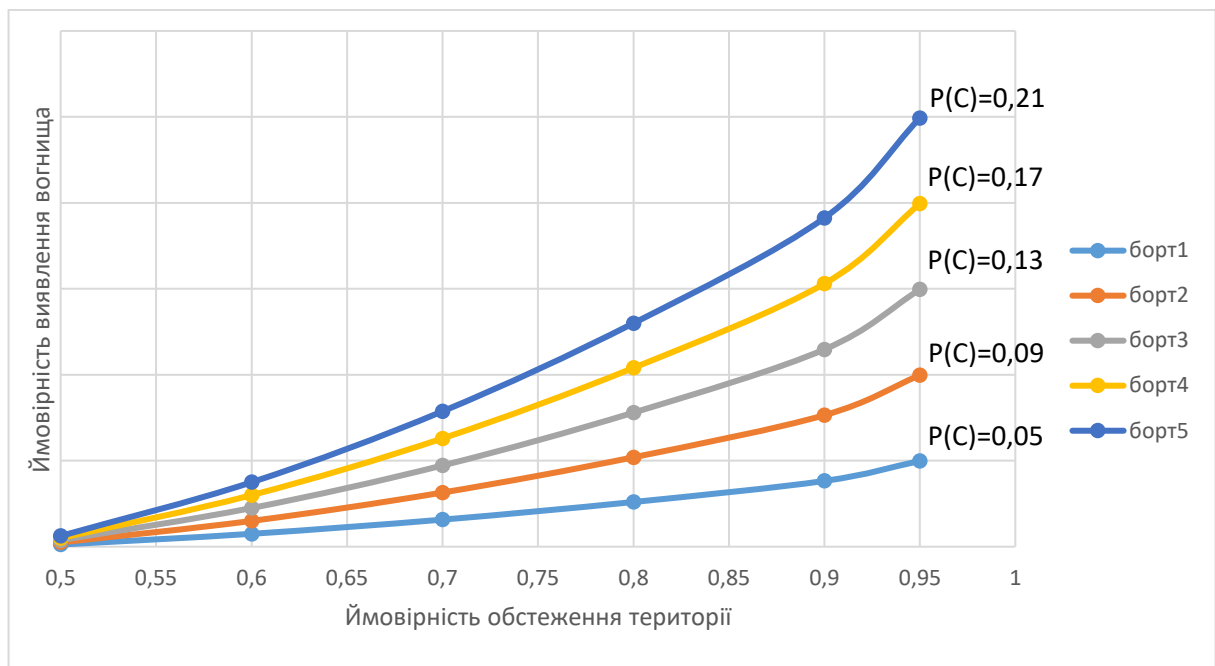


Рис. 6.9. Ймовірність виявлення вогнищ під час обстеження всієї території групою БПЛА
Перспективними напрямками використання БПЛА є лісове господарство.

6.3.2. Технологія інформаційної підтримки оперативних штабів з гасіння великих лісових пожеж, у тому числі в складних та надзвичайних умовах

Технологічні завдання: забезпечення високого (безперервного) рівня моніторингу за поширенням лісових пожеж, у тому числі великих, у несприятливих погодних умовах (сильне задимлення); передавання відеоінформації безпосередньо в оперативний штаб на видаленні до 50 км; ретрансляція сигналів УКХ-зв'язку, передавання цифрових пакетів інформації між командами гасіння і оперативним штабом з метою підвищення якості управління силами гасіння.

Ці завдання можуть бути виконані БПЛА малого та середнього класів. У разі підвищення вимоги щодо дальності передавання інформації до 100–150 км і більше, забезпечення сталої роботи в умовах складного рельєфу ці завдання можуть вирішуватися БПЛА середнього та великого класів.

Очікуваний результат: забезпечення безперервного рівня моніторингу лісопожежної ситуації в кризовій оперативній зоні, підвищення якості зв'язку на

пожежах у важкодоступних районах; зниження рівня загроз населеним пунктам і об'єктам економіки завдяки своєчасності прийняття штабами організаційних рішень (додаток Е).

6.3.3. Технологія інформаційної підтримки наземних сил із застосуванням БПЛА мікрокласу

Технологічні завдання: проведення польотів на малих висотах до 100 м у ближній зоні на відстані до 5 км, можливість проведення старту і посадки з будь-яких майданчиків обмежених розмірів.

Очікуваний результат: наведення наземних команд під час руху до пожежі малої площі або проблемну ділянку кромки пожежі в умовах пересічного рельєфу, інформаційна підтримка робіт з гасіння пожежі середніх розмірів, підтримка робіт з виставлення оточення в разі нестачі персоналу, моніторинг зміни небезпечних ситуацій на пожежі, підвищення ефективності наземного патрулювання.

6.3.4. Технологія планового лісопатологічного моніторингу стану контрольних ділянок лісового фонду

В умови гірської місцевості (Карпати, Крим) є проблема оперативного моніторингу стану лісового фонду на контрольних ділянках, отже потрібно забезпечити періодичність огляду кількох десятків ділянок, розташованих у віддалених важкодоступних районах по території регіону (суб'єкта) з метою своєчасного виявлення негативних лісопатологічних тенденцій. Організація роботи наземних команд для огляду контрольних ділянок – витратний захід, має низьку продуктивність, що вимагає відволікання людських ресурсів, іноді залучення дорогої авіації для доставлення команд. Застосування пілотованої авіації не забезпечує сталості та своєчасності з технічних і організаційних причин, водночас є дуже висока вартість цих робіт. Використання для таких цілей коштів

космічного моніторингу дає змогу частково зняти гостроту проблеми, але через технічні особливості не забезпечує достовірності результатів в оперативні терміни.

Потрібне виконання технологічних завдань: необхідне проведення автоматичного польоту за заданим маршрутом з видаленням понад 100 км від точки старту; виконання польотів за маршрутом у повітряному просторі, проведення аерофотознімання в контрольних точках з необхідними характеристиками (рис. 6.10).



Рис. 6.10. Результати аерофотознімання з БПЛА

Ці завдання можуть бути виконані БПЛА середнього та великого класу.

Очікуваний результат: завчасне виявлення районів з негативними лісопатологічними тенденціями, зниження витрат на проведення планового моніторингу стану лісів, адресне використання ресурсів служб щодо захисту лісу, запобігання можливої шкоди завдяки своєчасності реалізації лісозахисних заходів.

6.3.5. Технологія протидії незаконній господарській діяльності в лісах під час патрулювання лісового фонду

Накопичений досвід показав ефективність БПЛА малого класу у разі протидії незаконним вирубуванням дерев лісового фонду. Недоліками такого підходу є недостатня роздільна здатність оптичного каналу отримання відеоінформації, контроль за незначною зоною лісового фонду, необхідність одержання попередньої інформації про факти та координати місць незаконної діяльності. Усе це знижує оперативність заходів з протидії та недостатньо реалізовує потенціал повітряного спостереження за допомогою БПЛА. Тому потрібно застосування БПЛА, здатного

не тільки фіксувати факт незаконного вирубування та також наводити оперативні групи (додаток Е).

Потрібно реалізувати можливість пошуку ділянок лісового фонду з незаконною діяльністю, виявлення фактів знаходження виробничих сил (тракторів, команд нелегальних лісорубів і т.ін.) та їх активності. Подібні завдання можуть бути реалізовані в рамках системного технічного рішення, що використовує можливості наземних автономних датчиків отримання інформації про активність (сейсмічної активності лісовозної техніки, змін магнітного поля під час пересування автотранспорту або обладнання, акустичної і т.д.), технології реєстрації місць роботи приладів зв'язку (радіостанцій, мобільних телефонів тощо), збирання інформаційних даних за допомогою БПЛА і передавання їх оперативній групі. Такий підхід допоможе істотно розширити контрольований район, виявляти маршрути руху техніки та обсяги транспортування деревини, точки збирання протиправних осіб, зберігання обладнання, виявлення технологічного ланцюжка транспортування та реалізації незаконної деревини. Зазначені завдання можуть бути виконані БПЛА малого та середнього класів.

Очікуваний результат: підвищення розкриття злочинів в області незаконної господарської діяльності, організація ефективної системи охорони цінних ділянок лісового фонду від незаконного вирубування.

Наявний досвід показав, що застосування БПЛА для патрулювання лісового фонду є однією найскладніших завдань із технічного погляду. Обмеження радіуса ефективних дій БПЛА за дальністю прямого радіоканалу не дозволяє використовувати БПЛА малих класів для патрулювання територій лісового господарства понад 200 тис га, середня якість оптичних каналів БПЛА малих класів знижує радіус огляду камер до 10 км. Виконати ці завдання можна БПЛА з радіусом дії від 50 км до 150 км і спеціалізованим цільовим навантаженням з наступними характеристиками:

- оптичні системи високого дозволу з дальністю виявлення димової колонки пожежі розмірами 0,1 га;
- наявність інфрачервоного каналу виявлення;

- наявність системи передачі цифрових даних з високою пропускнуою здатністю;
- ретрансляція сигналів УКХ-зв'язку у напрямку пожежа–пожежа, пожежа–авіазагін, пожежа–лісництво;
- системи автоматичного виявлення (без участі оператора) та ідентифікації загорянь;
- наявність систем запобігання зіткнення в повітряному просторі.

Комплекс з подібними характеристиками міг би забезпечити проведення авіапатрулювання ділянок лісового фонду розмірами 1–1,5 млн га (рис. 6.11), що відповідає типовому навантаженню для літака типу Ан-2 або гелікоптера Мі-2. Він може бути реалізований на БПЛА середнього та великого класів. У разі реалізації даного напрямку розвитку БПЛА, слід зважати на те, що вітчизняні БПЛА великого класу з'явилися тільки в 2024 році. До цього моменту доцільно провести відпрацювання окремих технологій перспективного спеціалізованого цільового навантаження на БПЛА середнього класу.



Рис. 6.11. Результати авіапатрулювання ділянок лісового фонду з використанням БПЛА

Очікуваний результат: зниження собівартості проведення авіапатрулювання в 5–6 разів; зменшення залежності від авіакомпаній; забезпечення нормативної кратності патрулювання, підвищення гнучкості застосування авіації для завдань лісового господарства.

6.4. Методика обґрунтування комплексу засобів моніторингу лісових пожеж

6.4.1. Постановка проблеми

Одним з основних проблемних питань, що виникає під час розробки технологій виконання аерокосмічних робіт, є обґрунтування оптимального (раціонального) комплексу засобів оптико-електронного спостереження (ОЕСп) для моніторингу лісових пожеж із заданими замовником показниками оперативності та достовірності отримання інформації [19]. Результати аналізу та оцінювання можливості застосування засобів аерокосмічного моніторингу для спостереження за об'єктами та явищами викладені в [20]. Постановку задачі векторної оптимізації комплексу засобів оптико-електронного спостереження для аерокосмічного моніторингу лісових пожеж, що швидко поширюються розв'язано в [21]. Зроблений висновок, що задача обґрунтування раціонального комплексу засобів аерокосмічного моніторингу стану лісових пожеж, що швидко поширюються по суті, є векторною зворотною задачею оптимального розподілу різнорідного ресурсу засобів аерокосмічного моніторингу по об'єктах (явищах) спостереження та потребує негайного розв'язання для забезпечення потрібного рівня ефективності надання аерокосмічних послуг. Однак у відомій автору літературі методика розв'язання задачі у постановці [20] не розроблена у повному обсязі. Це ускладнює розроблення раціональних технологій надання аерокосмічних послуг.

Методологічні основи розв'язання задач векторної оптимізації досить повно розроблені, наприклад у [22–24]. Методи математичного програмування розглянуті в [25]. Класифікація відомих процедур розв'язання багатокритеріальних задач для різних випадків отримання інформації під час визначення найкращої альтернативи надані в роботі [24]. Підходи до формалізації пріоритетів особи, що приймає рішення (ОПР), наведені в [26, 27]. Однак відомі теоретичні та практичні

результати не конкретизовані для вирішення завдань розроблення раціональних технологій надання аерокосмічних послуг.

6.4.2. Етапи виконання досліджень

Математичним підґрунтям для розроблення методики є проведена в [20] постановка завдання обґрунтування раціонального комплексу засобів аерокосмічного моніторингу лісових пожеж, що швидко поширюються. Беручи до уваги результати [19], [20], методика містить три етапи, (додаток Є, рис.Є1): I – формування множини вихідних даних; II – визначення множини гіпотетично можливих засобів ОЕСп, що можуть виконувати аерокосмічні роботи; III – раціональний розподіл ресурсу різномірних засобів ОЕСп для забезпечення потрібної оперативності отримання іконічної інформації замовником аерокосмічних робіт.

На першому етапі (додаток Є, рис.Є.1) проводиться формування множини вихідних даних, що конкретизують вимоги ОПР до боротьби з лісовою пожежею, основних показників ефективності застосування комплексу аерокосмічних засобів ОЕСп. Для підготовки вихідних даних застосовуються методи: системного аналізу, декомпозиції та синтезу, ідеалізації, формалізації тощо з одночасним накопиченням інформації у відповідних базах даних (каталогах), (додаток Є, рис.Є.1). За результатами виконання першого етапу формуються масиви даних про:

- обстановку, що склалася (узагальнені данні про характер пожежі, можливі підходи до її гасіння; умови та чинники, що впливають на ефективність надання аерокосмічних послуг;
- загальні технічні характеристики засобів моніторингу, оброблення іконічної інформації, умови їх застосування;
- вимоги до оперативності надходження та оброблення іконічної інформації;
- прогностичні данні щодо напрямів розвитку пожежі;
- метеорологічні дані тощо.

На другому етапі методики (додаток Є, рис.Є.1) обґрунтовується та формується множина засобів ОЕСп, які гіпотетично придатні для виконання завдань з аерокосмічного моніторингу лісових пожеж, що швидко поширюється.

На третьому етапі методики раціонально розподіляється ресурс засобів ОЕСп по об'єктах моніторингу для подальшого вироблення технології надання аерокосмічних послуг з моніторингу стану лісових пожеж.

Виконання завдань I та II етапів у науковому сенсі труднощів не викликає та порядок їх виконання не буде деталізуватись у роботі.

Найменш проробленим у науковому сенсі є III етап. Деталізуємо порядок застосування методичного апарату. Зауважимо, що постановка зворотної задачі векторної оптимізації розподілу ресурсу неоднорідних засобів ОЕСп розв'язана автором у [19]. Сукупність цільових функцій та обмежень на їх параметри має вигляд [19]:

$$S_{\text{опт}}^{\text{акм}} \left(P_{jn_jf}^{\text{оес}}(Q_{jzf}) \right) = \left\{ \begin{array}{l} R_{\Sigma_i}^{\text{акм}} \left(Q_{jzf} \left(P_{\text{інфзаб}}^{\text{пож}}(S_i^{\text{акм}}) \right) \right) = \sum_{j=1}^m \sum_{z=1}^{n_j} \sum_{f=1}^F C_{jzf} \cdot Q_{jzf} \rightarrow \min \\ P_{\text{свз}}(Q_{jzf}) = \sum_{j=1}^{m_{\text{акм}}} \langle a_{jzf}^{\text{кз}} \cdot Q_{jzf}^{\text{кз}}(Q_{jzf}) + a_{jzf}^{\text{бпла}} \cdot Q_{jzf}^{\text{бпла}}(Q_{jzf}) + \dots \rangle \rightarrow \min \\ + a_{jzf}^{\text{піл}} \cdot Q_{jzf}^{\text{піл}}(Q_{jzf}) \end{array} \right\}; \quad (6.11)$$

$$P_{\text{вз}_i}^y(S_i^{\text{акм}}) \geq P_{\text{вз}_i\text{потр}}^y; \quad (6.12)$$

$$P_i^{\text{соі}}(S_i^{\text{акм}}) \geq P_{\text{потр}}^{\text{соі}}; \quad (6.13)$$

$$\bar{P}_{fn_j}^{\text{викр}} \geq P_{\text{потр}}^{\text{викр}}; \quad (6.14)$$

$$D_i(S_i^{\text{акм}}) \geq D_{\text{потр}}; \quad (6.15)$$

$$P_{\text{звз}}^{\text{акм}} \geq P_{\text{звззад}}^{\text{акм}}; \quad (6.16)$$

$$C_{jn_{jf}} \geq 0, f = 1, 2, \dots, F, \quad (6.17)$$

де $R_{\Sigma_i}^{\text{акм}}(\cdot)$ – ресурсні (економічні) затрати, пов’язані із застосуванням i -го варіанта комплексу засобів аерокосмічного моніторингу під час виконання робіт;

$P_{\text{свз}}(Q_{jzf})$ – складність виконання завдань з моніторингу об’єктів $Q^{\text{оакм}}$ у разі застосування i -го варіанта комплексу аерокосмічних засобів;

Q_{jzf} – сукупність різнотипних аерокосмічних засобів оптико-електронного спостереження f -го типу, що виконують завдання з моніторингу об’єкта i -го типу під час виконання j -го завдання аерокосмічних послуг, $f = 1 \dots F, j = 1 \dots m$;

$P_{\text{вз}_i}^{\text{у}}, P_{\text{вз}_i \text{ потр}}^{\text{у}}$ – імовірність виконання у повному обсязі завдань з управління комплектом засобів аерокосмічного моніторингу та її потрібний рівень відповідно;

$D_i(S_i^{\text{акм}}), D_{\text{потр}}$ – достовірність аерокосмічної інформації про об’єкти моніторингу у разі реалізації i -го варіанта комплексу засобів та її потрібний рівень відповідно;

$U^{\text{акм}}(S_i^{\text{акм}}), U_{\text{потр}}^{\text{акм}}$ – функціональна стійкість складу сукупності засобів аерокосмічного моніторингу у разі реалізації i -го варіанта складу комплексу $S_i^{\text{акм}}$ та її мінімально необхідний рівень;

$P_i^{\text{виявл}}(S_i^{\text{акм}}), P_{i \text{ потр}}^{\text{виявл}}$ – імовірність правильного виявлення (пошуку) випромінювань засобів передавання інформації космічних апаратів, БПЛА, пілотованих засобів наземними засобами приймання іконічної інформації та її потрібне значення відповідно;

$\bar{P}_i^{\text{соі}}(S_i^{\text{акм}}), \bar{P}_{i \text{ потр}}^{\text{соі}}$ – середня під час застосування i -го варіанту комплексу засобів аерокосмічного моніторингу ймовірність своєчасного отримання та оброблення іконічної інформації органами оброблення та аналізу та її мінімально допустиме значення відповідно;

$a_{jzf}^{\text{кз}}, a_{jzf}^{\text{БПЛА}}, a_{jzf}^{\text{піл}}$ – сукупність вагових коефіцієнтів, що враховують практичні складності виконання моніторингу відповідних об’єктів (явищ) z -го типу, $z = 1, 2 \dots \infty$;

$R_{ЗВЗ}^{акм}, R_{ЗВЗзад}^{акм}$ – імовірність зв'язності структури підсистеми аерокосмічного моніторингу.

Для розв'язання (6.11)–(6.17) в рамках загальної методики, (додаток Є, рис.Є.1), необхідно деталізувати структурну схему етапу оптимізації розподілу ресурсу засобів ОЕСп по об'єктах для подальшого вироблення технології надання аерокосмічних послуг з моніторингу стану лісових пожеж, що швидко поширюються. Зазначена послідовність повинна давати змогу на практиці під час розв'язання задачі (6.11)–(6.17) у рамках етапу III методики (додаток Є, рис. Є.1) враховувати багатокритеріальні пріоритети ОПР у організації боротьби з лісовою пожежею.

Проведені дослідження показали, що для розв'язання багатокритеріальної задачі (6.11)–(6.17) у разі потреби врахування невизначеності пріоритетів ОПР, на етапі III методики (додаток Е, рис.Е.1), доцільно використати метод послідовних поступок (додаток Е рис.Е.2). Під час практичної реалізації методу для визначення поступок особи, що приймає рішення, та вагових коефіцієнтів відносної важливості критеріальних функцій (6.11) можливо застосувати методи експертного оцінювання. Зокрема, методи частот переваг особи, що приймає рішення та Терстоуна [26], а також методу системного аналізу – методу послідовного викриття невизначеності цілей (додаток Є рис.Є.2).

Аналіз вартісної критеріальної функції $R_{\Sigma_i}^{акм}$ (6.11), дає змогу зробити висновок, що задача її екстремізації належить до багатоіндексної двоякої цілочисельної зворотної задачі лінійного програмування. Метод екстремізації суттєво визначається її вимірністю та характером сукупності обмежень.

Підходи до розв'язання зворотних двояких задач досліджені в [26, 27]. Однак результати отримані або в умовах розподілу однорідного ресурсу, або невисокої індексності (не більше 2) цільової функції та їх використання для отримання однозначного розв'язання задачі оптимізації комплекту засобів аерокосмічного моніторингу ускладнено.

Одним із підходів до зняття виникаючих суперечностей є пониження мірності матриці економічних показників. У такій постановці матриця економічних показників $\|C\| = \|C_{jzf}\|$ зводиться до матриці – рядка $\|C\|_{\text{пр}} = \|C_{zf}^{\text{кзс}}\|$ шляхом згортання за правилом, згідно з яким з елементів кожного стовпця матриці $\|C_{jzf}\|$ обирається мінімальний та його значення присвоюється індексу $C_{zf}^{\text{кзс}}$ матриці – рядка $\|C\|_{\text{пр}}$, де індекс кзс – «код типу засобу спостереження», який чисельно дорівнює номеру рядка, у який перебував мінімальний для z стовпця елемент матриці $\|C_{jzf}\|$.

Унаслідок запропонованого підходу задача мінімізації $R_{\Sigma_i}^{\text{акм}} \left(Q_{jzf} \left(P_{\text{інфзаб}}^{\text{пож}} (S_i^{\text{акм}}) \right) \right)$ у (6.11) спрощується до вигляду двохіндексної задачі

$$R_{\Sigma_i}^{\text{акм}} \left(Q_{jzf} \left(P_{\text{інфзаб}}^{\text{пож}} (S_i^{\text{акм}}) \right) \right) = \sum_{z=1}^{n_j} \sum_{f=1}^F C_{zf} \cdot Q_{jzf} \rightarrow \min. \quad (6.18)$$

Аналіз методів мінімізації вартісної критеріальної функції типу (6.11) дав змогу побудувати алгоритм її розв’язання на основі методу нормованих функцій з його адаптацією в бік врахування наявності відносно класичних підходів додаткового обмеження, що допомагає унеможливити випадки призначення засобів ОЕСп на об’єкти моніторингу, кількість яких перевищує кількість об’єктів, що потенційно існують (додаток Е рис.Е.1).

У рамках виконання етапу III методики також визначений метод мінімізації критеріальної функції $P_{\text{свз}}(Q_{jzf})$ складності виконання завдань з аерокосмічного моніторингу [19]. Водночас завдання мінімізації, по суті, є задачею визначення мінімально необхідної кількості засобів ОЕСп для забезпечення мінімізації функції складності виконання завдання в разі забезпечення потрібного рівня оперативності надходження іконічної інформації знайти ряд $X^0 = \{x_i^0\}_n = \min_{x_i} \{x_i\}_n = \min_{x_i} \sum_{i=1}^n x_i$, що забезпечує значення адитивної функції не менше заданого:

$$F(X) = \sum_{i=1}^n F_i(x_i) \geq F^{\text{зад}}(X) \quad (6.19)$$

за лінійного обмеження на змінні

$$(X = \sum_{i=1}^n x_i) \leq b, \quad b > 0, \quad (6.20)$$

ціле за умови їх цілочисельності та не негативності:

$$x_i \in \{0, 1, 2, \dots, b\}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (6.21)$$

Для зведення задачі мінімізації функції $P_{\text{свз}}(Q_{jzf})$ складності виконання завдань з аерокосмічного моніторингу (6.11)–(6.17) до умов (6.19)–(6.21) необхідно забезпечити адитивний характер цільової функції $P_{\text{свз}}(Q_{jzf})$, незалежність її складових, а також перехід від змінних $Q_{jzf}^{\text{кз}}, Q_{jzf}^{\text{БПЛА}}, Q_{jzf}^{\text{піл}}$ до функції $R_h(Q_{jzf}^{\text{кз}}, Q_{jzf}^{\text{БПЛА}}, Q_{jzf}^{\text{піл}})$.

Виконання умови адитивності цільової функції в методиці (додаток Е, рис. Е.1, Е.2) може бути забезпечено переходом від функції ймовірності несвоєчасного отримання інформації про обстановку [20] до функції часу отримання інформації, яка адитивна, шляхом логарифмування. Під час мінімізації використовуватимемо процес послідовного розподілу засобів $Q_{jzf}^{\text{кз}}, Q_{jzf}^{\text{БПЛА}}, Q_{jzf}^{\text{піл}}$ деякими порціями $\Delta Q_{jzf}^{\text{кз}}, \Delta Q_{jzf}^{\text{БПЛА}}, \Delta Q_{jzf}^{\text{піл}}$ відповідно на t -му кроці процесу.

Оптимальний алгоритм під час реалізації методу полягатиме у послідовному розподілі засобів порціями $\Delta r_{hv_t}^{(t)}$, величина яких та індекс hv_t визначаються відповідно до максимуму ефективності використання кожної одиниці засобів ОЕСп на кожному кроці процесу. Унаслідок виконання підходу (додаток Є, рис. Є.2), отримуються матриці, які формують оптимальний розподіл засобів ОЕСп по об'єктах моніторингу лісової пожежі, що швидко поширюється.

Детальну схему етапу III методики, конкретизована до проведених обґрунтувань подано в додатку Є, рис.Є.1. Зауважимо, що сірим кольором виділені елементи, які зазнали наукового вдосконалення під час розроблення методики. Не виділені елементи не нові з наукового погляду та лише підтверджують результати конкретизації підходів розроблених у [24–28], у площину виконання завдань надання аерокосмічних послуг з моніторингу лісових пожеж.

Унаслідок застосування методики (додаток Є, рис.Є.1, Є.2) для кожного етапу боротьби з пожежею отримуються матриці, елементи яких показують мінімальні кількості засобів ОЕСП, що необхідно застосувати, а індекси – номер типу об’єктів спостереження. Отримані матриці дають можливість здійснити призначення засобів аерокосмічного моніторингу на відповідні об’єкти моніторингу та розробити раціональну технологію надання аерокосмічних послуг за умови забезпечення потрібного рівня оперативності надходження іконічної інформації.

Отже, в роботі на основі математичного апарату теорії векторної оптимізації та раціонального розподілу різнорідного ресурсу удосконалено методику, яка вперше дає змогу обґрунтувати раціональний за критерієм «ресурсні витрати – складність надання аерокосмічних послуг – оперативність інформаційного обміну» комплект засобів аерокосмічного моніторингу стану лісових пожеж, що швидко поширюються [21, 22]. Водночас у рамках застосування методу послідовних прирощень оптимізація розподілу різнорідних засобів аерокосмічного моніторингу за ресурсною критеріальною функцією здійснюється на основі процедури пониження мірності матриці економічних показників та модифікованого методу нормованих функцій [28]. Мінімізація критеріальної функції складності надання аерокосмічних послуг проводиться методом послідовних прирощень.

Надалі доцільно детальніше дослідити можливість застосування в рамках методики, (додаток Е рис. Е.1, Е.2) нелінійних схем компромісного вибору варіантів комплектів засобів моніторингу в умовах широкого варіювання пріоритетів ОПР, зумовлених швидкими змінами у стані лісової пожежі.

Висновки до розділу 6

1. Побудована система управління значною мірою дасть можливість усунути недоліки наявних технічних розв'язків. Практичне завдання реалізації групового управління БПЛА приводить до підвищення ефективності використання БПЛА, а саме:

- можливість коригування плану та оптимізації маршруту польоту, ґрунтуючись на вже отриманих даних з інших БПЛА;
- збільшення вірогідності успішності виконання завдання;
- значний виграш у часі;
- можливість одночасного обстеження території та збільшення площі одночасного моніторингу;
- можливість постановки різних завдань для багатокomпонентних учасників групи БПЛА зважаючи на ефективність топології груп.

2. Аерофотознімання і аеровідеознімання з дистанційно пілотованих літальних апаратів (ДПЛА) застосовується як набагато дешевша альтернатива супутникової фотографії та аерофотознімання з літаків, вертольотів, повітряних куль, мотодельтапланів. Застосування надмалих БПЛА для отримання аерофотознімків вельми ефективно для невеликих за площею ділянок. Знімки, отримані за допомогою БПЛА на малих висотах, здатні забезпечити користувачів ГІС докладною і актуальною інформацією конкретної території.

3. БПЛА середнього та великого класів виконують завдання забезпечення безперервного рівня моніторингу лісопожежної ситуації в кризовій оперативній зоні, підвищення якості зв'язку на пожежах у важкодоступних районах; зниження рівня загроз населеним пунктам і об'єктам економіки завдяки своєчасності прийняття штабами організаційних рішень.

4. Застосування БПЛА мікрокласу дають змогу наведення наземних команд під час руху на пожежу малої площі або проблемну ділянку кромки пожежі в умовах пересічного рельєфу, інформаційної підтримки робіт з гасіння пожежі середніх розмірів, підтримки робіт з виставлення оточення в разі нестачі персоналу,

моніторинг зміни небезпечних ситуацій на пожежі, підвищення ефективності наземного патрулювання.

5. БПЛА середнього та великого класів дають можливість завчасно виявити райони з негативними лісопатологічними тенденціями, зниження витрат на проведення планового моніторингу стану лісів, адресне використання ресурсів служб щодо захисту лісу, запобігання можливої шкоди завдяки своєчасності реалізації лісозахисних заходів.

6. Завдяки використанню БПЛА малого та середнього класів підвищується розкриття злочинів в області незаконної господарської діяльності, організація ефективної системи охорони цінних ділянок лісового фонду від незаконних вирубувань.

7. Знижується собівартість проведення авіапатрулювання в 5–6 разів завдяки використанню груп БПЛА, зменшується залежність від авіакомпаній, забезпечується нормативна кратність патрулювання, підвищується гнучкість застосування БПС для завдань лісового господарства.

8. На основі математичного апарату теорії векторної оптимізації та раціонального розподілу різноманітного ресурсу удосконалено методику, яка вперше дає змогу обґрунтувати раціональний за критерієм «ресурсні витрати – складність надання аерокосмічних послуг – оперативність інформаційного обміну» комплект засобів аерокосмічного моніторингу стану лісових пожеж, що швидко поширюються.

Список використаних джерел до розділу 6

1. Kuchеров D. P., Kozub A. M. *Metodyi sinteza adaptivnyih sistem terminalnogo upravleniya*. Saarbrücken, Deutschland LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 325 p.

2. Компанієць О. М. Інформаційна технологія адаптивного управління роєм безпілотних літальних апаратів в антагоністичному середовищі. *Системи обробки інформації*. 2025. № 4 (179). С. 43–48. URL: <https://doi.org/10.30748/soi.2024.179.04>.

3. Stevens Brian L., Lewis Frank L., Johnson Eric N. Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Controls Design, and Autonomous Systems. John Wiley & Sons, Inc. 2016. 749 p. DOI: 10.1002/9781119174882.
4. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Інтеграційний підхід до завдання вибору маршруту групи БПЛА. *Штучний інтелект*. № 4 (62). 2013. С. 333–343.
5. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Планування маршруту БПЛА. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2013. № 5 (194). С. 189–192.
6. Kuchеров D., Kozub A. Path planning unmanned aerial vehicles in complex flight conditions. XI Міжнародна конференція доповідей «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)». 9–11 жовтня 2012 р. Вінниця: ВНТУ. 2012. С. 179.
7. Xu C., Xu M., Yin C. Optimized multi-UAV cooperative path planning under the complex confrontation environment. *Computer Communications*. Vol. 162, 2020, pp. 196–203. DOI: 10.1016/j.comcom.2020.04.050. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090419488&doi=10.1016%2fj.comcom.2020.04.050&partnerID=40&md5=254ebff5d78cf1aa5e370d6c2f2b20e4>.
8. Brooks R. A. A robust layered control system for air mobile robot. *IEEE Journal Robotics and Automation*. № 2(1). 1986. P. 14–23.
9. Montgomery J. F., Bekey G. A. Learning helicopter control through “teaching by showing”. *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 4. 1998, pp. 3647–3652.
10. Muslimov T. Z., Munasypov R. A. Adaptive decentralized flocking control of multi-UAV circular formations based on vector fields and backstepping. *ISA Transactions*. Vol. 107. 2020, pp. 143–159. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.08.011. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85089861416&doi=10.1016%2fj.Isatr.a.2020.08.011&partnerID=40&md5=31934e386881b1ee2375fd8f4b9ae86c>.
11. Marsh L. Multi-Agent UAV Path Planning / L. Marsh, G. Calbert, J. Tu, D. Gossink, H. Kwok. *Системи обробки інформації*, 2014, випуск 6 (122). Science and Technology Organization, Australia, 2005. P. 2188–2194.

12. Yu Y., Wang H., Liu S., Guo L., Yeoh P.L., Vucetic B., Li Y. Distributed Multi-Agent Target Tracking: A Nash-Combined Adaptive Differential Evolution Method for UAV Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. 70. Is. 8, art. No. 9464745, 2021, pp. 8122–8133. DOI: 10.1109/TVT.2021.3091575. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85112448995&doi=10.1109%2fTVT.2021.3091575&partnerID=40&md5=94c74d85ada071bd8e12e351bb406ee6>.

13. Zhen Z., Chen Y., Wen L., Han B. An intelligent cooperative mission planning scheme of UAV swarm in uncertain dynamic environment. *Aerospace Science and Technology* Vol. 100. 2020, art. No. 105826. DOI: 10.1016/j.ast.2020.105826 URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85081909161&doi=10.1016%2fj.ast.2020.105826&partnerID=40&md5=2d74539f1cc28eac734c3bb1934b9546>.

14. Kuchеров D. P. Modeling traffic in control problems of robotic systems. *Proceedings the Fifth world congress “Aviation in XXI-st century”*, September 25–27, 2012. Vol. 1. Kyiv, 2012. P. 1.9.18–1.9.21.

15. Ali K. S., Arkin R. C. Multiagent Teleautonomous Behavioral Control. *Machine Intelligence and Robotic Control*. 2000. Vol. 1. № 2. P. 3–10.

16. Бондарєв Д. І., Стасюк О.С. Впровадження та застосування безпілотної авіації в аеронавігаційній системі України: матеріали XIV міжн. наукової конф. студентів та молодих учених «Політ-2014. Сучасні проблеми науки». Київ, 2–3 квітня 2014 р. Київ: НАУ, 2014.

17. Бондарєв Д. І., Джафарзаде Р. М., Козуб А. М. Ефективність групових польотів безпілотних апаратів. Зб. наук. пр. *Системи обробки інформації*: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. 2014. Вип. 6 (122). С. 9–14.

18. Козуб А. М. Технології виконання авіаційних робіт безпілотними літальними апаратами: зб. матер. IX Міжнар. наук.-практ. конф. «Нові горизонти в наукових дослідженнях: забезпечення військ (сил) та застосування геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 28 квітня 2026 року. Київ: НУОУ. 2026. С. 801–804.

19. Козуб А. М., Суворова Н. О. Аналіз засобів збору інформації для геоінформаційних систем. *Системи озброєння і військова техніка*. – Харків: ХУПС. 2011. № 3 (27). С.42–47.

20. Козуб А. М., Суворова Н. О. Оптимізація комплекту засобів оптико-електронного спостереження аерокосмічного моніторингу лісових масивів. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. Харків: ХАІ. 2012. № 3. С.108–112.

21. Козуб А. М. Методика обґрунтування комплекту засобів моніторингу лісових пожеж. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2014. № 4 (211). С. 194–199.

22. Козуб А. М., Білобородов О. О. Обґрунтування комплекту оптико-електронної апаратури аерокосмічних засобів моніторингу. *Управління розвитком складних систем*. Вип. 21. Київ: КНУБА, 2015. С. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2015.21>.

23. Boyd Stephen, Vandenberghe Lieven. *Convex Optimization*. Cambridge University Press. 2004. 727 p.

24. Зайченко Ю. П. Дослідження операцій. 5-те видання, перероб. і доп, Київ, 2001. 688 с.

25. Дослідження операцій: Побудова економіко-математичних моделей: практикум [Електронне видання]: навч. посіб.; уклад.: О. Г. Жданова, В. Д. Попенко, М. О. Сперкач. Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. 79 с.

26. Ehrgott Matthias. *Multicriteria Optimization*. Springer Science & Business Media. 2005. 323 p.

27. Anokhin. A. M., Glotov V. A., Pavelyev V. V., Cherkashin A. M. Анохин А. М. Methods for determining the coefficients of criteria importance. *Automation and Telemechanics*. 1997. № 8. С. 3–35.

28. Nguyen Thi Dieu Linh, Nguyen Hong Son, Dang Xuan Thao. Evaluating the Impact of Weighting Methods on the Stability of Scores for Alternatives in Multi-Criteria Decision-Making Problems. *Engineering, Technology and Applied Science Research*. Vol. 15. No. 1, 2025, pp. 19998–20004. DOI: 10.48084/etasr.9518.

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні розроблено теоретичні засади побудови групового управління БПЛА та викладено нові методи керування окремим апаратом, групою, оцінювання оператора та формування інтегрального алгоритму покращення виконання завдання моніторингу земної поверхні.

На основі отриманих результатів дослідження можна зробити висновки теоретичного, методичного та практичного характеру, серед яких головними є такі:

1. Під час проведення системних наукових досліджень, спрямованих на вивчення можливостей підвищення ефективності моніторингу, здобувачем виявлено суперечність між вимогами до моніторингу і необхідними технічними характеристиками систем групового управління БПЛА, що дало змогу сформулювати науково-технічну проблему щодо відсутності методологічного та методичного апаратів забезпечення виконання завдань побудови економічно доцільних систем групового управління БПЛА, які б задовольняли вимоги сучасності і перспективи.

2. Унаслідок вивчення сучасних методів групового управління розв'язано наукову проблему, що полягає в необхідності розроблення методів забезпечення цілеспрямованих дій групи і гарантування безпеки взаємних дій на основі використання протоколу консенсусу, методів потенціального поля, нових методів управління нелінійними об'єктами тільки на основі поточної інформації про функціонування об'єктів групи, контрольованої за допомогою наявних вимірювальних засобів (датчиків), обґрунтовано мету та завдання дослідження.

3. Досліджені в роботі основні завдання систем групового управління, що виконують БПЛА, дали можливість визначити типові математичні моделі, які використовуються для оптимізації системи керування окремим апаратом, і знайти для них закони керування, які забезпечують мінімальний час і точність регулювання, а також визначити базовий математичний апарат аналізу та синтезу систем управління БПЛА як нелінійного об'єкта.

4. Основою математичного апарату аналізу і синтезу групового управління БПЛА є метод простору станів (фазової площини). Наведені в роботі алгоритми діють з вихідними даними в матричному (векторному) вигляді. Для розв'язання задачі побудови маршруту застосовано підхід на основі поліномів Без'є, що використовуються у векторній графіці під час створення ліній довільної форми, перевагою якого є обмежена кількість маршрутних точок, що задаються, інваріантність щодо операції масштабування, що допомагає зберегти форму кривої у разі зміни масштабу основи (карти), забезпечується гладкість кривої і відсутність коливань між маршрутними точками-орієнтирами, що гарантує задовільну кривизну траєкторії.

5. У дисертації розроблено алгоритми, призначені для виконання завдань стабілізації руху, які гарантують знаходження зображуваної точки керованого об'єкта в деякій околиці заданої траєкторії. Особливістю методів управління є стабілізація руху повздовж заданої траєкторії нестійких об'єктів, математична модель яких має нульові та уявні полюси. Математичне моделювання підтверджує ефективність розроблених алгоритмів, час регулювання в порівнянні з об'єктами, математична модель яких має негативні полюси, не гірше одиниць відсотків (2...4 % під час моделювання). Швидкодія досягається використанням спеціальних законів керування перемикального типу та навчання ПД-регулятора для керування математичною моделлю об'єкта управління з повністю невідомими параметрами.

6. Достовірність одержаних результатів підтверджено:

- логічністю запропонованих підходів до опису процесів функціонування систем управління;
- коректним використанням математичного апарату наукових методів, раніше апробованих для виконання завдань в умовах невизначеності;
- коректністю викладення запропонованих теоретичних положень;
- підтвердженням отриманих результатів під час проведення машинних експериментів на моделях-аналогах, що свідчить про достатню відповідність розроблених математичних моделей описуваним процесам. Розбіжність

результатів машинних експериментів на розроблених математичних моделях не перевищує 10 %.

У процесі виконання завдання синтезу всі розроблені методи досліджувалися на збіжність шляхом оцінювання деякої квадратичної функції типу Ляпунова. Монотонно спадний характер цієї функції дає змогу стверджувати про збіжність запропонованих алгоритмів навчання.

7. Велике практичне значення мають програмні моделі, розроблені автором і подані в дисертаційній роботі, для розв'язання задачі моніторингу. Особливістю розроблених методів є індивідуальний підхід до проєктування системи автоматичного управління.

8. Унаслідок проведення експериментально-теоретичних досліджень на прикладі системи моніторингу математичного та імітаційного моделювання підтверджено ефективність результатів теоретичних досліджень, викладених в основній частині дисертаційної роботи; розроблена система інтегрованого типу забезпечує виграш у часі в 2,52 рази, за точністю в 1,52 рази, збільшення ймовірності виконання завдання на 40 %.

9. Побудована система групового управління БПЛА має підвищену функціональну стійкість управління під час виконання типових завдань, що доцільно використовувати для виконання різних господарчих та промислових завдань.

Запропоновані в дисертаційній роботі математичні моделі та методи дають можливість:

1) формалізувати процес застосування багатопозиційної системи автономних повітряних об'єктів для функціонально стійкого управління при реалізації групового польоту БПЛА в умовах відмов інформаційного каналу;

2) забезпечувати точне відтворення бокового руху апарата завдяки двоканальній системі управління БПЛА квадаторного типу;

3) здійснювати налаштування ПД-контролерів градієнтного типу для керування рухом квадатора за умов апріорної невизначеності математичної

моделі, квазіоптимальний режим роботи якого, поступається оптимальному режиму лише 3%;

4) підвищити швидкість збіжності розробленого алгоритму налаштування ПІД-контролерів градієнтного типу на 4 % порівняно з вбудованим алгоритмом пакету Simulink;

5) розрахувати ефективність реконфігурації мультиагентної системи, яка відбувається зі швидкістю більшою за інтенсивність виходу агентів з ладу приблизно у 2–5 разів;

6) підвищити ефективність застосування БПЛА, що підтверджує необхідність спеціальної підготовки операторів (які пройшли 4 і більше тренінгів та рівень операторських помилок яких становить 0,018) для виконання завдань за призначенням.

Результати дисертаційної роботи впроваджені для потреб Міністерства оборони України, Національної академії наук України, а також вищих навчальних закладів України, що підтверджується актами реалізації та впроваджені:

у Центральному науково-дослідному інституті озброєння та військової техніки Збройних Сил України (НДР, шифр «Стратосфера-Р», акт від 15.09.2016 р.);

у Науково-виробничій впроваджувальній фірмі «Геотехнологія», м. Київ (акт від 18.08.2022 р.);

в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України під час підготовки звітних матеріалів за темою НДР «Розробка засобів інформаційно-аналітичної підтримки завдань забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури в регіональній соціоєкосистемі за умов зростання природних, техногенних і соціальних загроз» (№ ДР 0121U109216, акт від 10.09.2024 р.);

у навчальному процесі Національного університету «Київський авіаційний інститут» під час підготовки бакалаврів та магістрів за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології» у дисциплінах «Мультиагентні системи

управління» та «Інтелектуальні системи управління в авіації» (акт від 11.09.2024 р.);

в освітньому процесі Національної академії оборони України на кафедрі геопросторової підтримки та застосування космічних систем у навчальній дисципліні «Організація застосування спеціальних комплексів для виконання завдань розвідки» (акт від 07.10.2024 р.);

у ТОВ «Аерокосмічне агентство «Магеллан», м. Київ (акт № 1-02/25 від 10.01.2025 р.).

10. Мета дослідження, яка полягала у підвищенні ефективності застосування багатопозиційної системи безпілотних повітряних об'єктів під час виконання групових завдань завдяки впровадженню запропонованої методології – досягнута, та всі часткові завдання виконані повністю. Наукові результати досліджень є внеском у теорію систем управління та інформаційних технологій під час управління груповим рухом БПЛА для виконання різних завдань.

Додаток А

Список публікацій здобувача

1. Замичковський В. П., Козуб А. М., Шолохов С. М. Напрями застосування БПЛА в інтересах Збройних Сил України з урахуванням тенденцій ведення війн 6-го та 7-го поколінь: Зб. наук. пр. Київ: ЦНДІ ЗСУ. 2011. Вип. № 2 (88). С. 45–55.
2. Зуйко В. В., Козуб А. М., Михалевич В. Е., Сучасний стан та тенденції розвитку космічних систем дистанційного зондування Землі провідних країн світу. Науково-технічний журнал Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України. 2015. №.2(6). С. 51–60.
3. Козуб А. М., Шумейко В. О., Зуйко В. В., Ніколаєнко О.Є. Аналіз досвіду використання космічних систем та безпілотних авіаційних комплексів в сучасних локальних конфліктах та перспективи їх розвитку. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ: НУОУ. 2018. № 3(33). С. 53–60. DOI: 10.33099/2311-7249/2018-33-3-53-60.
4. Kuchеров D. P., Kozub A. M., Dzhafarzade R. M. Bepilotnyie letatelnyie apparaty pri vyipolnenii kollektivnyih deystviy. МАА. Elmi Məcmuələr. 2014. Cild 16. № 1. S. 1–8.
5. Kuchеров D. P., Kozub A. M. Metodyi sinteza adaptivnyih sistem terminalnogo upravleniya. Saarbrücken, Deutschland LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 325 p.
6. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Термінальне керування динамічною системою третього порядку в умовах обмежених збурень. Вісник інженерної академії України. 2013. № 3–4. С. 95–99.
7. Automated systems in the aviation and aerospace industries. Chapter 7. Synthesis of the Laws of Motion Control of a UAV Group With Natural Obstacles / Dmytro Kuchеров, Minglei Fu Zhejiang, Andrei Kozub. • copyright 2019 • 486 pp (193–219) • Identifiers: LCCN 2018036333| ISBN 9781522577096 (h/c) | ISBN 9781522577102. DOI: 10.4018/978-1-5225-7709-6.ch007 (проіндексовано в базі даних Scopus).

8. Kuchеров D., Rasstrygin A., Sushchenko O., Zhdanov S., Kozub A. Synthesis of the switching control law for a quadrotor autopilot. *International Journal of Engineering & Technology* 7(4), 3065-3068, 2018, DOI: 10.14419/ijet.v7i4.16368 **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.
9. Kuchеров Dmytro, Sushchenko Olga, Kozub Andrey, Petrov Anton. Assessment operator-pilot training in conflict situation. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019. Vol. 2588, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.55056/ceur-ws.org/Vol-2588/paper1.pdf> **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.
10. Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A., Skrynkovskyy R. Stabilizing the spatial position of a quadrotor by the backstepping procedure. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* Vol. 23, No. 2, August 2021, pp. 1188–1199. ISSN:2502-4752. DOI:10.11591/ijeecs.v23.i2. pp. 1188-1199, **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.
11. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Планування маршруту БПЛА. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2013. № 5(194). С. 189–192.
12. Кучеров Д. П., Голенківська Т. І., Жданов С. В., Рудаков В. І., Станіщук А. Б., Твердохлібов В. В., Козуб А. М. Спосіб формування маршруту безпілотного літального апарата: пат. на корисну модель 117211 зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 26.06.2017.
13. Кучеров Д. П., Козуб А. М., Костина О. М. Управління мультиагентною системою в потенціальному полі. *Науково-технічний журнал Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України*. 2017. № 2 (14). С. 55–61.
14. Kuchеров D., Kostyna O., Kozub A. Group of UAVs Moving on Smooth Control Law with Fixed Obstacles. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* Vol. 2, No. 3, 1034-1041 (2017), DOI: 10.25046/aj0203131 **(проіндексовано в базі даних Scopus)**.
15. Кучеров Д.П., Козуб А.М. Інтеграційний підхід до завдання вибору маршруту групи БПЛА. *Штучний інтелект*. № 4 (62). 2013. С. 333–343.

16. Кучеров Д. П., Козуб А. М., Голенковська Т. І. Реконфігурація мультиагентних систем в умовах завад. Наука і оборона. 2016. № 3. С. 52–58.
17. Дихтяренко В. Н., Кучеров Д. П., Козуб А. М. Алгоритм налаштування вагових коефіцієнтів нейроконтролера при керуванні динамічними об'єктами. Науковий вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2014. № 2(14Е). С. 27–35.
18. Бондарєв Д. І., Джафарзаде Р. М., Козуб А. М. Ефективність групових польотів безпілотних апаратів: Зб. наук. пр. «Системи обробки інформації» Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. 2014. Вип. 6(122). 206 с. С. 9–14.
19. Козуб А. М., Суворова Н. О. Аналіз засобів збору інформації для геоінформаційних систем. Системи озброєння і військова техніка. Харків: ХУПС. 2011. Вип. № 3 (27). С. 42–47.
20. Козуб А. М., Суворова Н. О. Оптимізація комплекту засобів оптико-електронного спостереження аерокосмічного моніторингу лісових масивів. Авиационно-космическая техника и технология. Харків: ХАІ. 2012. Вип. № 3. С. 108–112.
21. Козуб А. М. Методика обґрунтування комплекту засобів моніторингу лісових пожеж. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2014. № 4(211). С. 194–199.
22. Козуб А. М., Білобородов О. О. Обґрунтування комплекту оптико-електронної апаратури аерокосмічних засобів моніторингу. Управління розвитком складних систем. Вип. 21. Київ: КНУБА. 2015. С. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2015.21>.
23. Козуб А. М. Оцінка бойових можливостей з радіоподавлення супутникового зв'язку з використанням БПЛА постановки перешкод в операціях. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ: НУОУ. 2014. № 3(21). С. 23–26. DOI: 10.33099/2311-7249/2014-0-3(21)-23-26.
24. Заклевський Д. Є., Зуйко В. В., Козуб А. М. Методика оцінювання стійкості структури системи супутникового зв'язку: Зб. наук. пр. «Системи

управління, навігації та зв'язку». Київ: ЦНДІ Н і У. 2011. Вип. № 4 (20). С. 279–283.

25. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Оцінка пропускну́ї здатності групи безпілотних літальних апаратів під час виконання завдання з моніторингу. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ: НУОУ. 2015. № 2 (23). С. 70–74. DOI: [https://doi.org/10.33099/2311-7249/2015-0-2\(23\)-70-74](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2015-0-2(23)-70-74).

26. Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A., Nakonechnyi V. Assessing the operator's readiness to perform tasks of controlling by the unmanned aerial platforms. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, 2020, 5(4), pp. 457–462, <https://dx.doi.org/10.25046/aj050454> (проіндексовано в базі даних Scopus).

Список апробацій здобувача

1. Козуб А. М., Пронь С. В. Огляд стану ринку безпілотних засобів, які можуть бути задіяні для охорони об'єктів від пожеж. III Міжнар. наук-практ. конф. «Інформаційні технології, системний аналіз і моделювання соціоекологоекономічних систем». – Київ: НАУ. 19–21 жовтня 2011 р. С. 219–220.

2. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Математична модель колективного впорядкованого руху БПЛА. V Міжнар. наук-практ. конф. «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси» (ПРТК-2012). Київ: НАУ. 15–16 травня 2012 р. С. 66–68.

3. Kozub A. M., Suvorova N. O., Pron' S. V. Optimization of a set of surveillance means for ground aerospace monitoring in agriculture and forestry. V Всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації космічні технології». Київ: НАУ. 25–27 вересня 2012 р. С. 7.36–7.40.

4. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Моделювання поздовжнього руху в задачах групового керування безпілотними літальними апаратами. XIX Міжнар. конф. з автоматичного управління «Автоматика / AVTOMATICS – 2012». Київ: НУХТ. 2012. С. 322.

5. Kuchеров D., Kozub A. Path planning unmanned aerial vehicles in complex flight conditions. XI Міжнародна конференція доповідей «Контроль і управління в

складних системах (КУСС-2012)». 9–11 жовтня 2012 р. Вінниця: ВНТУ. 2012. С. 179.

6. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Мультиагентний підхід до задачі вибору маршруту: матеріали VI Міжнар. наук-практ. конф. «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2013)», 27–29 травня 2013 р. Київ: НАУ. 2013. С. 195–197.

7. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Алгоритм керування обмеженою групою БПЛА: матеріали XX Міжнар. конф. з автом. управ. «Автоматика / Automatics – 2013», 25–27 вересня 2013 р. Миколаїв: Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. 2013. С. 242–243.

8. Кучеров Д. П., Козуб А. М. Інтеграційний підхід до завдання вибору маршруту групи БПЛА: матеріали Міжнар. наук. молод. школи «ССИИ–2013». 23–27 вересня 2013 р. сел. Кацивелі, АР Крим, Україна. Донецьк: Інститут проблем штучного інтелекту, 2013. С. 144–146.

9. Козуб А. М. Аерокосмічні засоби оптико-електронного моніторингу стану лісових пожеж: матеріали V Міжнар. наук-практ. конф. «Проблеми розвитку транспортних систем і логістики». 5–8 травня 2014 р. Луганськ: Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2014. С. 134–136.

10. Козуб А. М. Використання методу організації колективного мультиагентного управління групою БПЛА для доставки вантажу: матеріали VII наук-техн. конф. «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення». 23–24 жовтня 2014 р. Київ: Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації державного університету телекомунікацій. 2014. С. 104–105.

11. Козуб А. М. Застосування групи БПЛА з використанням агентського підходу для вирішення завдання коригування вогню артилерії: матеріали науково-практичної конференції “Перспективи розвитку ракетних військ і артилерії Сухопутних військ”, 5–6 листопада 2014 р. Львів: Академія сухопутних військ імені Гетьмана Петра Сагайдачного. 2014. С. 73–76.

12. Козуб А. М. Агентний підхід щодо рішення завдання постановки перешкод станціям супутникового зв'язку з використанням БПЛА: матеріали ХХ Всеукр. наук-практ. конф. «Проблеми створення, розвитку та застосування високотехнологічних систем спеціального призначення». 28 листопада 2014 р. Житомир: Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова. 2014. С. 152–153.
13. Кучеров Д. П., Козуб А. М., Іванов Б. П. Інформаційне забезпечення групового польоту БПЛА: матеріали наук-практ. конф. «Перспективи розвитку автоматизованих систем управління військами та геоінформаційних систем». 29 січня 2015 р. Львів: Академія сухопутних військ імені Гетьмана Петра Сагайдачного, 2015. С. 249–251.
14. Козуб А. М. Оцінка пропускнуої здатності групи безпілотних літальних апаратів при виконанні завдання моніторингу: матеріали наук-практ. конф. «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки та досвід її експлуатації в особливий період». 25 червня 2015 р. Київ: Державний науково-дослідний інститут авіації. 2015. С. 36.
15. Kuchеров D., Kozub A. Control System Objects with Multiple Streams of Information. Proceedings. 2015 IEEE 3rd International Conference “Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)”, October 13–15, 2015. P. 290–293. DOI: 10.1109/APUAVD.2015.7346623 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).
16. Козуб А. М., Шумейко В. О. Роль космічних систем та безпілотних авіаційних комплексів в сучасних локальних конфліктах: матеріали міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 7 квітня 2016 р. Київ: НУОУ. 2016. С. 124–126.
17. Kuchеров D., Kozub A., Kostyna O. Group behavior of UAVs in obstacles presence. 2016 IEEE 4th International conference «Methods and systems of navigation and motion control»(MSNMC), October 18–20, Kiev Ukraine, p. 51–54. DOI: 10.1109/MSNMC.2016.7783104 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).
18. Козуб А. М., Шумейко В. О., Кащисин О. Л. Методика планування застосування безпілотних авіаційних комплексів на основі результатів оброблення

даних космічної розвідки: матеріали наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 5 квітня 2017 р. Київ: НУОУ. 2017. С. 116–119.

19. Варламов І. Д., Козуб А. М., Шумейко В. О. Аналіз технологій застосування Україною даних космічного і повітряного спостереження Збройними Силами України: матеріали наук-практ. конф. «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи». 4 жовтня 2017 р. Київ: Національний центр управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України. 2017. С. 84–86.

20. Kuchеров D., Kozub A. and Rasstrygin A., "Setting the PID Controller for Controlling Quadrotor Flight: a Gradient Approach", 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kiev, Ukraine, 2018, pp. 90–93. DOI: 10.1109/MSNMC.2018.8576294 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

21. Kuchеров D., Kozub A. Model of UAV as agent of multiagent system. 2018 IEEE International Conference of Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT 2018), 2018, pp. 343–347. DOI: 10.1109/DESSERT.2018.8409156. (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

22. Зуйко В. В., Козуб А. М., Павлунько М. Я. Взаємодія космічних систем та безпілотних авіаційних космічних систем для виконання завдань розвідки та ураження: зб. матер. IV Міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 10 квітня 2019 року. Київ: НУОУ. 2019. С. 54.

23. Kuchеров D., Sushchenko O., Kozub A. Operator Training for Unmanned Aerial Vehicles Control. 2019 IEEE 5th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development, APUAVD 2019. Proceedings, 2019, pp. 31–34, 8943918. DOI: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943918 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

24. Kuchеров D., Kozub A. Backstepping Algorithm for Controlling of Quadrotor. 2020 IEEE 6th International conference “Methods and systems of navigation

and motion control”(MSNMC), October 20–23, Kiev Ukraine, p. 51–55. DOI: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255518 (проіндексовано в базі даних Scopus).

25. Kuchеров D., Kozub A., Tkachenko V., Rosinska G., Poshyvailo O. PID Controller Machine Learning Algorithm Applied to the Mathematical Model of Quadrotor Lateral Motion. 2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development, APUAVD 2021. Proceedings, 2021, pp. 86–89. DOI:10.1109/APUAVD53804.2021.9615438 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

26. Козуб А. М., Шумейко В. О., Мосійчук Д. І. Взаємодія безпілотних авіаційних систем для виконання завдань спостереження та ураження: зб. матер. VI Міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 23 травня 2023 року. Київ: НУОУ. 2023. С. 104–106.

27. Козуб А. М. Синтез системи прийняття рішень керування безпілотною системою в умовах невизначеності: зб. матер. VII Міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 24 квітня 2024 року. Київ: НУОУ. 2024. С. 159–161.

28. Козуб А. М. , Кучеров Д. П. , Пошивайло О. М. Рекомендаційна система для ефективного функціонування повітряного транспорту в складних умовах польоту: зб. тез доп. XV Міжнар. наук-практ. конф. «Комп’ютерні системи та мережні технології» (CSNT-2024). 25–26 квітня 2024 р. Київ: НАУ. 2024. С. 83–84.

29. Козуб А. М. Варіант побудови системи управління групових дій безпілотних літальних апаратів: зб. матер. VIII Міжнар. наук-практ. конф. «Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 30 жовтня 2025 року. Київ: НУОУ. 2025. С.173–174.

30. Kuchеров D., Khalimon N., Tkachenko V., Myroshnychenko I., Kozub A. Determination of Coordinates of Airborne Objects From Signals of Ground Emitters. 2025 IEEE 8th International Conference on Methods and Systems of Navigation and

Motion Control (MSNMC), Kyiv, Ukraine, 2025, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSNMC61130.2025.11399688 (**проіндексовано в базі даних Scopus**).

31. Козуб А. М. Технології виконання авіаційних робіт безпілотними літальними апаратами: зб. матер. IX Міжнар. наук-практ. конф. «Нові горизонти в наукових дослідженнях: забезпечення військ (сил) та застосування геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони». 28 квітня 2026 року. Київ: НУОУ. 2026. С. 801–804.

Додаток Б

Акти впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ

ТВО начальника Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
полковник



В.В. СОТНИК

2016 р.

АКТ

про реалізацію результатів наукових досліджень
Козуба Андрія Миколайовича

Комісія у складі:

голови комісії — тимчасово виконуючого обов'язки заступника начальника Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України з наукової роботи полковника Головіна О.О.;

членів комісії:

тимчасово виконуючого обов'язки начальника науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Повітряних Сил Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України підполковника Бунакова В.П.;

головного наукового співробітника науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Повітряних Сил Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України працівника Збройних Сил України Довгополого А.С.;

ТВО начальника науково-дослідного відділу розвитку авіаційної техніки та озброєння науково-дослідного управління розвитку озброєння та військової техніки Повітряних Сил Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України підполковника Зірки А.Л. встановила, що результати наукових досліджень, а саме, — методика векторної оптимізації комплексу засобів оптико-електронного спостереження для розвідки заданих районів; алгоритм управління обмеженою групою безпілотних літальних апаратів при виконанні завдання просторового перекриття території заданої площі з урахуванням критерію ступеня виконання завдань колективом групи, особисто отримані Козубом А.М. та реалізовані під час обґрунтування тактико-технічних вимог до стратегічного безпілотного авіаційного комплексу, які розроблені у ході виконання науково-

дослідної роботи, шифр “Стратосфера-Р”, що виконувалась Центральним науковим-дослідним інститутом озброєння та військової техніки Збройних Сил України за замовленням Департаменту військово-технічної політики, розвитку озброєння та військової техніки Міністерства оборони України.

Голова комісії:
полковник

Члени комісії:
підполковник

підполковник



О.О. ГОЛОВІН

В.П. БУНАКОВ

А.С. ДОВГОПОЛИЙ

А.Л. ЗІРКА



ГЕОТЕХНОЛОГІЯ

Науково-виробнича впроваджувальна фірма

02098, Україна, Київ-98, вул. Дніпровська набережна, 7, к.23.
Тел./факс +38 044553-95-74; тел. +38 044553-01-79; моб. тел.
+38 066 616 79 27 E-mail: geotech-m@mail.ru

18 серпня 2022р. № 8/3

АКТ

впровадження результатів дисертаційних досліджень Козуба Андрія Миколайовича

Засвідчуємо, що результати наукових досліджень на основі матеріалів дисертаційної роботи Козуба Андрія Миколайовича впроваджені у Науково-виробничій Впроваджувальній Фірмі «ГЕОТЕХНОЛОГІЯ».

Запропоновані методи, методики, моделі, алгоритми дозволили удосконалити апаратуру дистанційного керування вертикальної аеродинамічної енерговітроустановки ВАДЭУ – Інтегратор Природных Энергий ИПЭ «СМЕРЧ» та підвищити ефективність навчання операторів при ліквідації аварій вибухо-імпульсними технологіями в напрямку забезпечення екологічної безпеки. Переваги впровадження результатів дисертаційних досліджень полягають в тому, запропоновані методи, методики, моделі, алгоритми, що дозволяють оцінювати ефективність вирішуваних завдань при управлінні багатопозиційною авіаційною транспортною системою, створити систему управління колективними діями безпілотних повітряних об'єктів багатопозиційної транспортної системи. Розроблений науково-методичний апарат дозволяє оцінювати адекватність та достовірність моделі багатопозиційної системи безпілотних повітряних об'єктів при виконанні авіаційних робіт для типових завдань. Запропонований науково-методичний апарат дозволяє знизити обчислювальну складність за рахунок використання інтегральних оцінок та покращує можливості оператора БПЛА при виконанні нештатних, аварійних ситуацій в порівнянні з існуючими методичними розробками.

Дисертаційні дослідження Козуба Андрія Миколайовича мають важливе значення для науки і технічних розробок. Рекомендуємо Козубу А.М. продовжити дослідження в даному напрямку.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався, у зв'язку з науковими призначенням результатів.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

*Член Комитета по вопросам промышленного партнёрства
и научно-производственной кооперации Торгово-промышленной
палаты Украины*
Генеральный директор,



Мухин Е.А.

ЗАТВЕРЖУЮ

Т.в.о. директора Інституту
телекомунікацій і глобального
Інформаційного простору
НАНУ д.т.н. Лебідь О.Г.

АКТ
впровадження результатів дисертаційного дослідження
Козуба Андрія Миколайовича

Комісія Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ у складі: голови комісії Триснюк В.М., та членів комісії – Яковлєва Є.О., Охарєва В.О. засвідчує окремі наукові результати дисертаційного дослідження, отримані особисто Козубом А.М., впроваджено при підготовці звітних матеріалів за темою ІНДР «Розробка засобів інформаційно-аналітичної підтримки завдань забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури в регіональній соціоecosystemі за умов зростання природних, техногенних і соціальних загроз» (№ ДР 0121U109216),

Зокрема Козубом А.М. . розроблений алгоритм налаштування контролерів PD типу градієнта для керування рухом квадрантора. Порівняння запропонованого алгоритму на основі градієнтного підходу з вбудованим алгоритмом пакету Simulink показало кращу швидкість збіжності запропонованого алгоритму налаштування відповідно до розробленої математичної моделі керування бічним рухом.

Розроблений Козубом А.М. науково-методичний апарат дозволяє створити систему управління групою БПЛА, планувати маршрути групи безпілотних літальних апаратів, оцінювати різні підходи до побудови мультиагентних систем з БПЛА, оцінювати ефективність групових польотів безпілотних літальних апаратів.

Рекомендуємо Козубу А.М. продовжити дослідження в даному напрямку.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався, у зв'язку з науковими призначенням результатів.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії

Завідувач відділу досліджень
навколишнього середовища д.т.н, проф. Триснюк В.М.

Члени комісії

Головний науковий співробітник
д.т.н., с.н.с.

Старший науковий співробітник
к.т.н.,с.н.с.

 Яковлев Є.О.
 Охарєв В.О.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційного дослідження в навчальний процес
Національного авіаційного університету

Ми, що нижче підписалися, декан факультету комп'ютерних наук та технологій, к.т.н., доцент Фесенко А.О., завідувач кафедри інтелектуальних кібернетичних систем, д.т.н., професор Нечипорук О.П. склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Козуба Андрія Миколайовича "Методологія синтезу управління багатопозиційною системою автономних повітряних об'єктів" використовуються у навчальному процесі Національного авіаційного університету, факультету комп'ютерних наук та технологій на кафедрі інтелектуальних кібернетичних систем.

Вид результату, що впроваджується	Форма впровадження	Ефект від впровадження
1. Метод управління рухом мультиагентної системи, агентами якої є БПЛА.	У навчальних програмах дисциплін: – "Мультиагентні системи управління" для спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія ОПП "Системне програмування" підготовки здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Бакалавр» №РБ-4-123-2/22(стн)-3.15, РБ-4-123-2/22(стн)-3.15, що затверджена 22.11.2022 р.;	Підвищення якості навчання. Інтенсифікація навчального процесу.
2. Метод управління БПЛА квадаторного типу шляхом введення двох каналів керування для забезпечення точного відтворення бокового руху апарату.	– "Інтелектуальні системи управління в авіації", для спеціальності 126 Інформаційні системи та технології ОПП "Інтелектуальні системи та технології" підготовки здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Магістр» № РМ-4-126/23-2.1.6, що затверджена 24.10.2023 р.	
3. Метод налаштування ПІД-контролерів градієнтного типу за умов апріорної невизначеності математичної моделі.	– "Інтелектуальні системи управління в авіації", для спеціальності 126 Інформаційні системи та технології ОПП "Інтелектуальні системи та технології" підготовки здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Магістр» № РМ-4-126/23-2.1.6, що затверджена 24.10.2023 р.	
4. Метод формування маршруту БПЛА з кривими Без'є.	У кваліфікаційних роботах.	

В.о. декана факультету комп'ютерних наук та технологій

Андрій ФЕСЕНКО

Завідувач кафедри інтелектуальних кібернетичних систем

Олена НЕЧИПОРУК

ЗАТВЕРДЖУЮ

Тимчасово виконуючий обов'язки заступника
начальника університету з навчальної роботи
полковник



Микола ПАЛАМАР

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження
полковника Козуба Андрія Миколайовича в освітній процес
Національного університету оборони України

Підстава:

Меморандум про наукове співробітництво між Національним університетом оборони України та Національним центром управління та випробувань космічних засобів, вх. НУОУ від 16.02 2023 року № 182/641;

наказ начальника Національного університету оборони України "Про організацію впровадження наукових результатів дисертацій здобувачів ступеня доктора філософії (доктора наук)" від 05 жовтня 2023 року № 504/нод.

Комісія у складі:

голови комісії: начальника інституту логістики та підтримки військ (сил), доктора філософії, полковника Возняка Р.М.;

членів комісії: заступника начальника науково-методичного центру організації та провадження освітньої діяльності, кандидата педагогічних наук, полковника Торчевського Р.В.;

заступника начальника науково-методичного центру організації наукової та науково-технічної діяльності, кандидата військових наук, старшого дослідника, полковника Курбана В.А.;

тимчасово виконуючого обов'язки начальника кафедри геопросторової підтримки та застосування космічних систем, доктора технічних наук, старшого наукового співробітника, полковника Ракушева М.Ю.

розглянула впровадження матеріалів дисертаційного дослідження Козуба А. М. в освітній процес, а саме:

метод аналізу ієрархій процесів, заснований на ідентифікації однотипних показників, шляхом введення узагальненого показника продуктивності оператора, який є лінійною функцією часткових різномірних

критеріїв якості з невідомими ваговими коефіцієнтами, ефективність якого підтверджена чисельними прикладами;

удосконалений метод формування маршруту БПЛА з кривими Без'є, що використовуються в векторній графіці при створенні ліній довільної форми, перевагою яких є обмежена кількість маршрутних точок, що задаються, інваріантність щодо операції масштабування, що дозволяє зберегти форму кривої при зміні масштабу основи (карти), гладкість кривої і відсутність коливальності між маршрутними точками-орієнтирами, що забезпечує задовільну кривизну траєкторії.

Комісія встановила:

1. Результати дисертаційного дослідження впроваджені на кафедрі геопросторової підтримки та застосування космічних систем – в рамках навчальної дисципліни “Організація застосування спеціальних комплексів для виконання завдань розвідки”;

Тема 1. Заняття 3. Методика планування застосування БпАК в операціях (бойових діях).

2. Представлені матеріали дисертаційного дослідження Козуба А.М. вважати впровадженими в освітній процес слухачів Національного університету оборони України.

Голова комісії: полковник

Роман ВОЗНЯК

Члени комісії: полковник

Руслан ТОРЧЕВСЬКИЙ

полковник

Володимир КУРБАН

полковник

Михайло РАКУШЕВ

Директор ТОВ «АА «Магеллан»

КОЩЕНКО А.О.

10 січня 2025 р.



АКТ №1 –02/25
впровадження результатів дисертаційних досліджень
Козуба Андрія Миколайовича

Комісія ТОВ «Аерокосмічне агентство «МАГЕЛЛАН» у складі: голови комісії – Кощенко Андрія Олександровича, та членів комісії: Мар'євича Андрія Васильовича, Глінкіна Сергія Юрійовича та Гарбуза Володимира Васильовича – у період з 06.01.2025 року по 06.02.2025 року розглянула основні результати дисертаційного дослідження, отримані особисто Козубом А.М., а саме:

запропоновані методи, методики, моделі, алгоритми, що дозволяють оцінювати ефективність вирішуваних завдань при управлінні безпіотною авіаційною системою, створити систему управління колективними діями безпілотних повітряних об'єктів багатопозиційної транспортної системи.

Розроблений науково-методичний апарат дозволяє створити систему управління групою БПЛА, планувати маршрути групи безпілотних літальних апаратів, оцінювати різні підходи до побудови мультиагентних систем з БПЛА, оцінювати ефективність групових польотів безпілотних літальних апаратів.

Запропонований науково-методичний апарат дозволяє оцінювати адекватність та достовірність моделі багатопозиційної системи безпілотних повітряних об'єктів при виконанні цільових завдань, знизити обчислювальну складність за рахунок використання інтегральних оцінок та покращує можливості оператора БПЛА при виконанні нештатних, аварійних ситуацій в порівнянні з існуючими методичними розробками.

Основні результати дисертаційних досліджень автора опубліковані у фахових наукових виданнях та апробовані та наукових конференціях, зокрема:

1. Козуб А.М., Суворова Н.О. Оптимізація комплекту засобів оптико-електронного спостереження аерокосмічного моніторингу лісових масивів. Научно-технический журнал "Авиационно-космическая техника и технология" – Х.: ХАІ – 2012 – Вип.№ 3 . – С. 108 – 112.
2. Кучеров Д.П., Козуб А.М. Планирование маршрута БПЛА. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2013. – № 5(194). – С. 189 – 192.
3. Кучеров Д.П., Козуб А.М. Интеграционный подход к задаче выбора маршрута группы БПЛА. Научно-теоретический журнал "Искусственный интеллект" інституту проблем штучного інтелекту. – №4(62). – 2013. – С. 333 – 343.
4. Кучеров Д.П., Дихтяренко В.Н., Козуб А.М. Алгоритм настройки весовых коэффициентов нейроконтроллера при управлении динамическими объектами. Збірник наукових праць Всеукраїнської наукової конференції з міжнародною участю "Нейросітьові технології та їх застосування", 11 грудня 2013 р. – Краматорськ: Донбаська державна машинобудівна академія, 2013. – С. 17 – 25.
5. Кучеров Д.П., Козуб А.М. Терминальное управление динамической системой третьего порядка в условиях ограниченных помех. Вісник інженерної академії України. – 2013. – № 3 – 4. – С. 95 – 99.
6. Кучеров Д.П., Козуб А.М. Методы синтеза адаптивных систем терминального управления. Saarbrücken, Deutschland LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 325 p. Монографія.
7. Бондарев Д.І., Джафарзаде Р.М., Козуб А.М. Ефективність групових польотів безпілотних апаратів. Збірник наукових праць "Системи обробки інформації" Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – 2014. – Вип. 6(122). – 206 с. – С. 9 – 14.
8. Козуб А.М. Методика обґрунтування комплекту засобів моніторингу лісових пожеж. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2014. – №4(211). – С. 194 – 199.
9. D. Kuchеров, A. Kozub. Path planning unmanned aerial vehicles in complex flight conditions. XI Міжнародної конференції доповідей "Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)", 9 – 11 жовтня 2012 р. – Вінниця: Вінницький науково-технічний університет, 2012. – 283 с. – С. 179.
10. Кучеров Д.П., Козуб А.М. Мультиагентный подход к задаче выбора маршрута. Матеріали шостої міжнародної науково-практичної конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2013)", 27 – 29 травня 2013 р. – К.: Національний авіаційний університет, 2013. – С. 195 – 197.
11. Кучеров Д.П., Козуб А.М. Алгоритм управления ограниченной группой БПЛА. Матеріали XX Міжнародної конференції з автоматичного управління "Автоматика / Automatics – 2013", 25 – 27 вересня 2013 р. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2013. – С. 242 – 243.

12. Кучеров Д.П., Козуб А.М. Интеграционный подход к задаче выбора маршрута группы БПЛА. Материалы международной научной молодежной школы “Системы и средства искусственного интеллекта ССИИ –2013”, 23 – 27 сентября 2013 г. пос. Кацивели, АР Крым, Украина. – Донецьк: Інститут проблем штучного інтелекту, 2013. – С. 144 – 146.

13. Козуб А.М. Використання методу організації колективного мультиагентного управління групою БПЛА для доставки вантажу. Матеріали VII науково-технічної конференції “Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення”, 23 – 24 жовтня 2014 р. – К.: Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації державного університету телекомунікацій, 2014. – С. 104 – 105.

Дисертаційні дослідження Козуба Андрія Миколайовича мають важливе значення для науки і технічних розробок. Рекомендуємо Козубу А.М. продовжити дослідження в даному напрямку.

Економічний ефект від впровадження не розраховувався, у зв'язку з науковими призначенням результатів.

Акт складено для представлення в спеціалізовану вчену раду та не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород.

Голова комісії

Кощенко А.О. _____



Члени комісії:

Мар'євич А.В. _____

Глінкін С.Ю. _____

Гарбуз В.В. _____

Додаток В

Блок-схема алгоритму моделі БПЛА

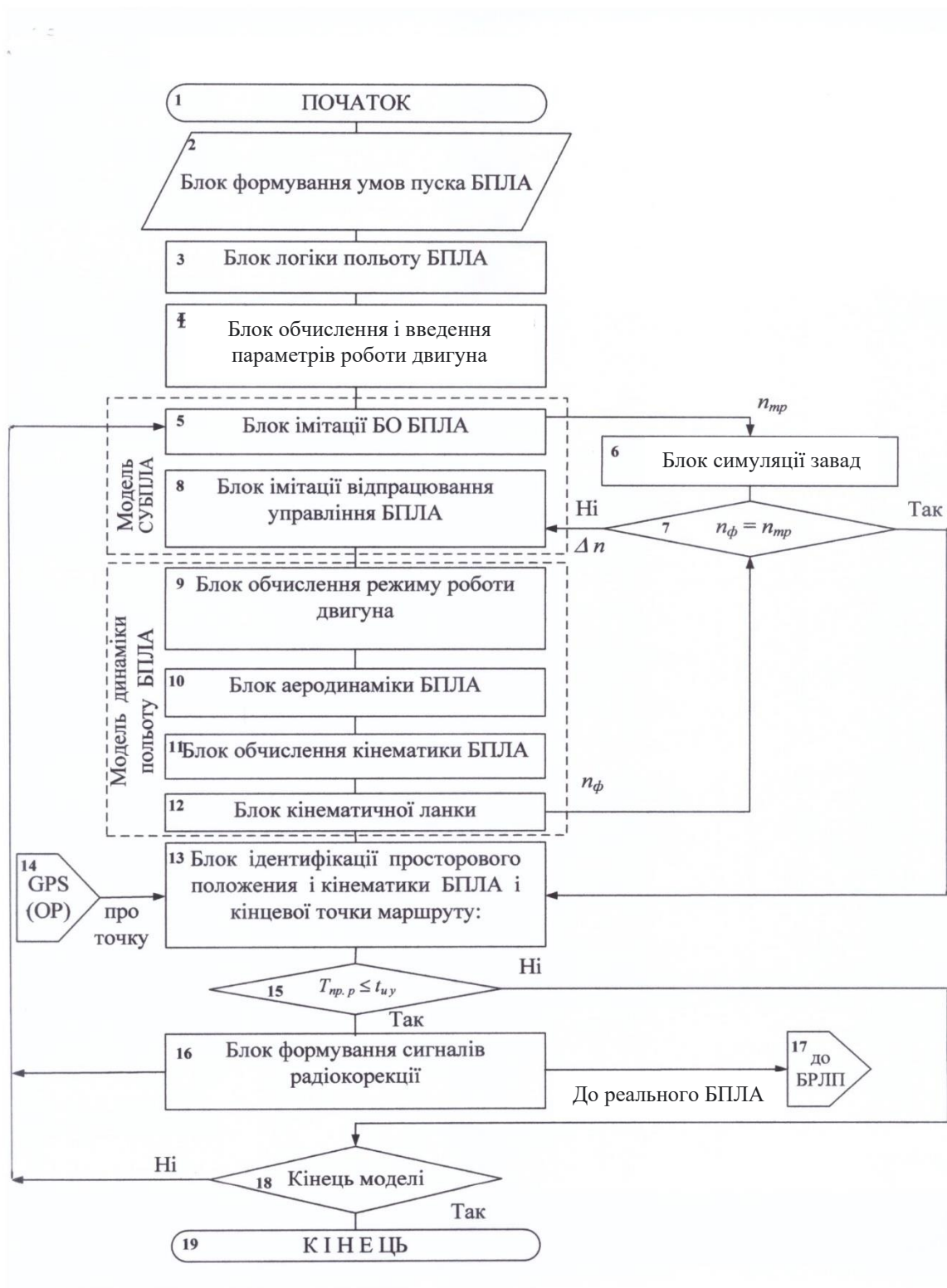


Рис.В.1. Блок-схема алгоритму моделі БПЛА

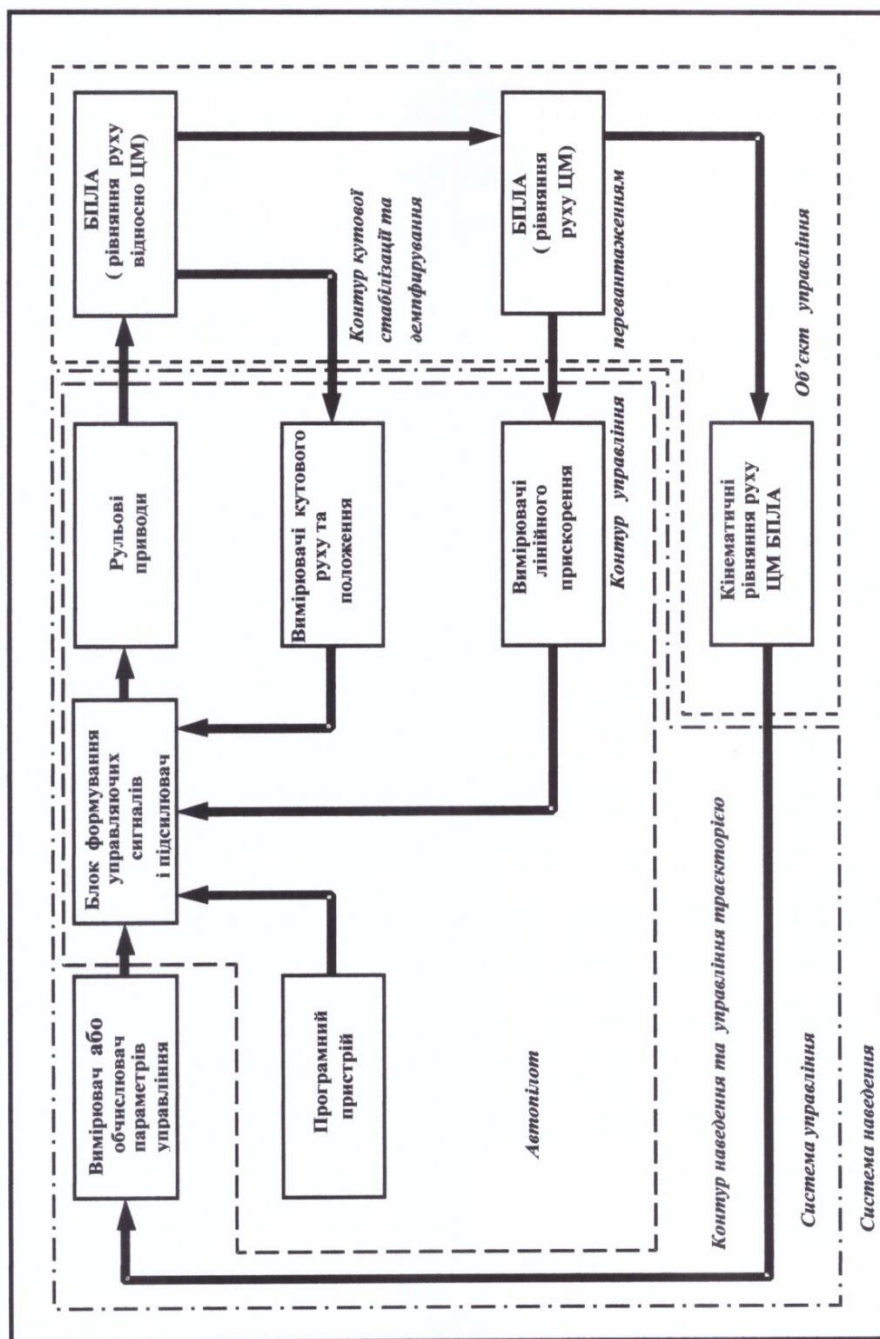
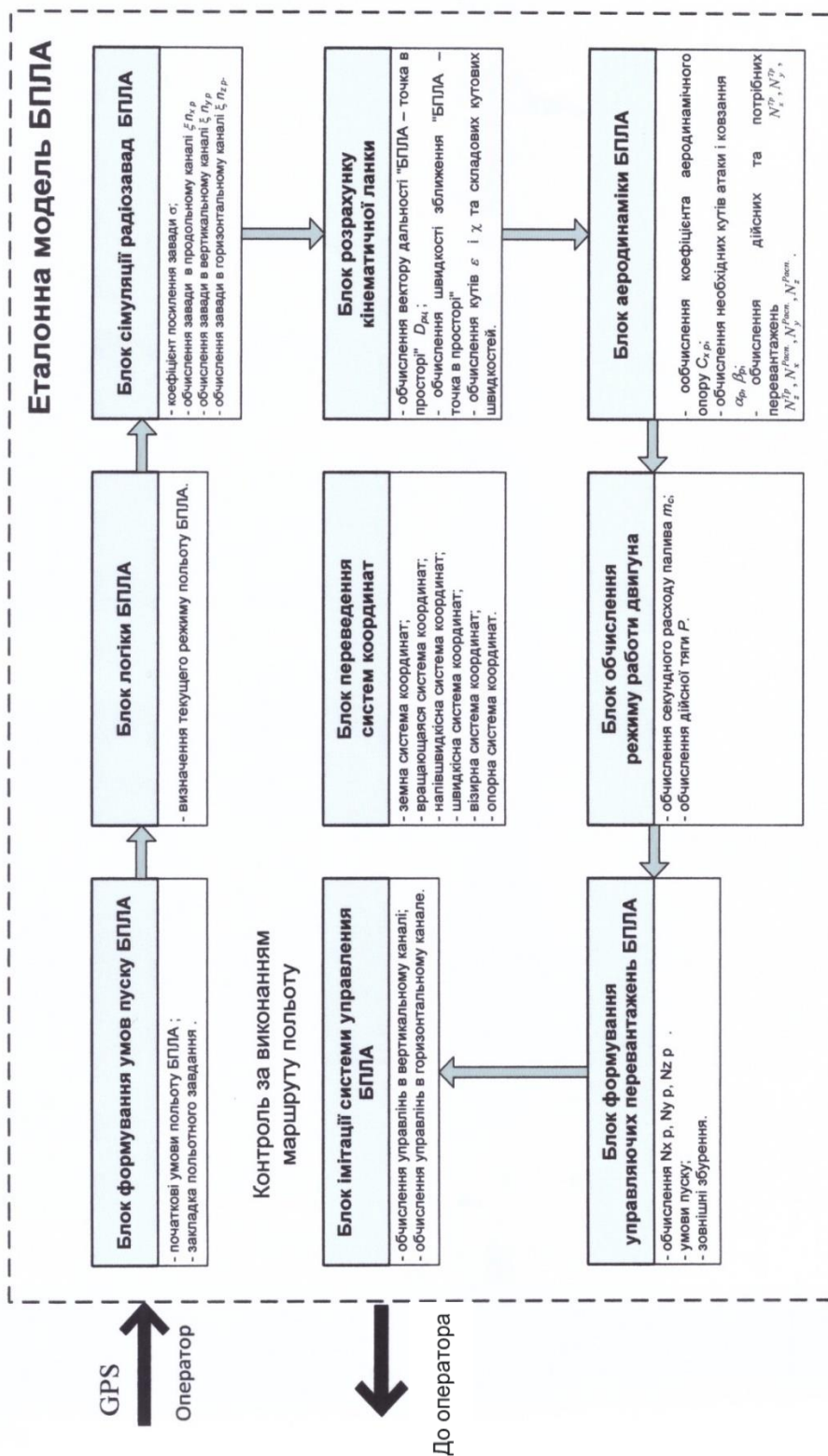


Рис.В.2. Структурна схема системи управління БПЛА



Додаток Г

Доведення теореми

Доведення. Розглянемо випадок $\varphi(h, p) = p$, $h = 1$ (хоча доведення можна розглядати для будь-якого $h > 0$).

Для кожного $q \in Q$ і $p_r < 0$ і виконання співвідношень (2.105) маємо

$$\hat{q}_{r+1} = \hat{q}_1 + \hat{p}_1 + \hat{p}_2 + \dots + \hat{p}_r. \quad (\Gamma 1)$$

Помножимо обидві сторони (Г1) на q , отримаємо

$$q\hat{q}_{r+1} = q\hat{q}_1 + q\hat{p}_1 + q\hat{p}_2 + \dots + q\hat{p}_r. \quad (\Gamma 2)$$

Виконуючи заміну $\hat{q}'_{r+1} = \hat{q}_{r+1} - \hat{q}_1$ і використовуючи ідентичність (2.108), напишемо (Г2) у форму

$$q\hat{q}'_{r+1} \geq ra. \quad (\Gamma 3)$$

Для вектора ваги q'_{r+1} у лівій частині (Г3) використовуємо нерівність Коші-Шварца:

$$|\hat{q}'_{r+1}|^2 \geq \frac{(\hat{q}'_{r+1}q)^2}{|q|^2}. \quad (\Gamma 4)$$

Припустимо, що в (2.109) $a > 0$, отримаємо

$$|\hat{q}'_{r+1}|^2 \geq \frac{a^2}{|q|^2} r^2. \quad (\Gamma 5)$$

Вираз (Г5) є оцінкою для вектора ваги, збільшення якого не повинно перевищувати квадратичну функцію числа корекцій.

З іншого боку, оскільки для всіх j

$$\hat{q}_{j+1} = \hat{q}_j + \hat{p}_j, \quad (\Gamma 6)$$

отримаємо

$$|\hat{q}_{j+1}|^2 = |\hat{q}_j|^2 + 2\hat{q}_j\hat{p}_j + |\hat{p}_j|^2. \quad (\Gamma 7)$$

Зважаючи на те, що $\hat{q}_j\hat{p}_j \leq 0$ рівність (Г7) може бути замінена

$$|\hat{q}_{j+1}|^2 - |\hat{q}_j|^2 \leq |\hat{p}_j|^2, \text{ for all } j. \quad (\Gamma 8)$$

Додаючи всі ці нерівності для $j = 1, \dots, r$, можна записати

$$|\hat{q}_{j+1}|^2 \leq \sum_{j=1}^r |\hat{p}_j|^2. \quad (\Gamma 9)$$

Беручи до уваги співвідношення (2.106), нерівність (Г9) можна записати як

$$|\hat{q}_{j+1}|^2 \leq rM. \quad (\Gamma 10)$$

Співвідношення (Г10) означає, що квадрат вагового вектора не може збільшуватися швидше, ніж лінійна функція числа кроків.

Нерівності (Г4) і (Г10) суперечливі, тому кількість виправлень вагового вектора можна знайти з рівності

$$rM = \frac{a^2}{|q|^2} r^2, \quad (\Gamma 11)$$

або

$$r = \frac{M}{a} |q|^2. \quad (\Gamma 12)$$

Отриманий вираз відповідає твердженню теореми.

Додаток Д

ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС РОЗРОБЛЕННЯ МАРШРУТУ І ПОЛЬОТНИХ ЗАВДАНЬ МОНІТОРИНГУ

(Керівництво оператора)

І. Програмний комплекс «Розроблення маршрутів»

1.1. Загальний опис програмного комплексу (ПК) «Розроблення маршрутів»

Призначення програми

ПК «Розроблення маршрутів» призначений для створення маршруту польоту ДПЛА на тлі цифрової карти району спостереження (ЦКРС), корекції раніше розроблених маршрутів і збереження розробленого маршруту в базі даних польотів ДПЛА зі встановленням логічного зв'язку створеного маршруту з вибраними для виконання екологічного спостереження за завданнями. ПК дає змогу вести одночасне розроблення або корекцію маршрутів по двох каналах.

Для виконання завдань відповідно до своїх призначень ПК «Розроблення маршрутів» містить такі програмні компоненти: управління і відображення ЦКМ; завдання і редагування точки стояння НПУ; прокладання і редагування маршруту; збереження маршруту в БД.

Умови виконання програми

Програмний комплекс «Розробка маршрутів» є додатком і функціонує під управлінням ОС Windows / Linux / MCBC. Для функціонування ПК необхідна наявність СУБД «Лінтер-ВС» та ІГІС «Інтеграція МС». Для роботи ПК «Розроблення маршрутів» необхідні налаштування і активізація СУБД «Лінтер-ВС».

Виконання програми

Запуск ПК «Розроблення маршрутів» проводиться шляхом запуску файлу route.exe.

Завершення роботи ПК «Розробка маршрутів» здійснюється командою головного меню «Файл» – «Вихід» або натисканням кнопки «» панелі інструментів або натисканням керувальні кнопки «» (Close) головного вікна програми (рис. Д.1).

1.2. Програмний компонент управління і відображення цифровий карти району спостереження

Призначення програми.

Програмний компонент (ПК) управління і відображення ЦКРС призначений для організації інтерфейсу оператора тренажера під час управління картою, що відображається.

Згідно зі своїм призначенням ПК забезпечує виконання таких функцій: налаштування параметрів відображення карти; переміщення карти у вікні перегляду; масштабування карти; додавання (видалення) файлів матричної інформації про рельєф місцевості; додавання (видалення) файлів екологічної обстановки; додавання (видалення) файлів растрових карт; збереження (завантаження) карти в (з) БД; створення нового вікна по виділеній області; надання оператору програмного інтерфейсу для роботи і управління ЦКРС за допомогою використання команд меню і кнопок панелі інструментів.

Умови виконання програми

Вихідними даними для ПК управління і відображення ЦКРС є ім'я файлу цифрової карти місцевості, імена файлів матричної інформації, екологічної обстановки і растрових карт.

Виконання програми

Головне вікно ПК управління і відображення ЦКРС (рис. Д.1) має таку структуру: назва вікна; керувальні кнопки; рядок головного меню; панель інструментів; робоча область; смуги прокручування; інформаційна панель.

Для інформування оператора в назві вікна вказується назва файлу, що відображається в ЦКРС, і її масштаб.

Кнопки допомагають оператору управляти головним вікном ПК:

- кнопка «» – згорнути вікно в кнопку на панелі завдань;
- кнопка «» – розгорнути вікно до розмірів екрана;
- кнопка «» – відновити нормальне положення вікна;
- кнопка «» – закрити вікно.

Рядок головного меню дозволяє забезпечити швидкий доступ оператора до повного переліку необхідних для роботи команд, що розміщуються залежно від їх призначення, у відповідних пунктах головного меню: «Карта», «Вид», «Сервіс», «Вікна», «Допомога». Вибір команд з меню, що випадає можна здійснити за допомогою маніпулятора «миша» або кнопок панелі інструментів.

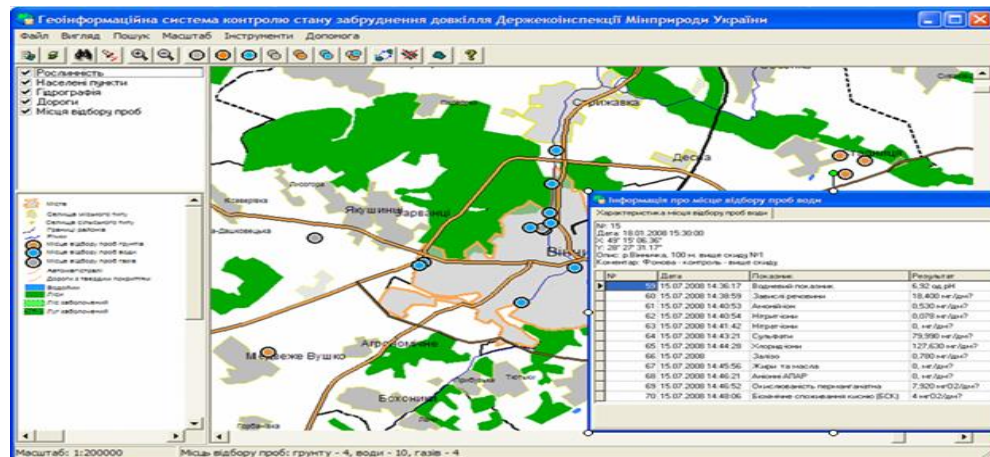
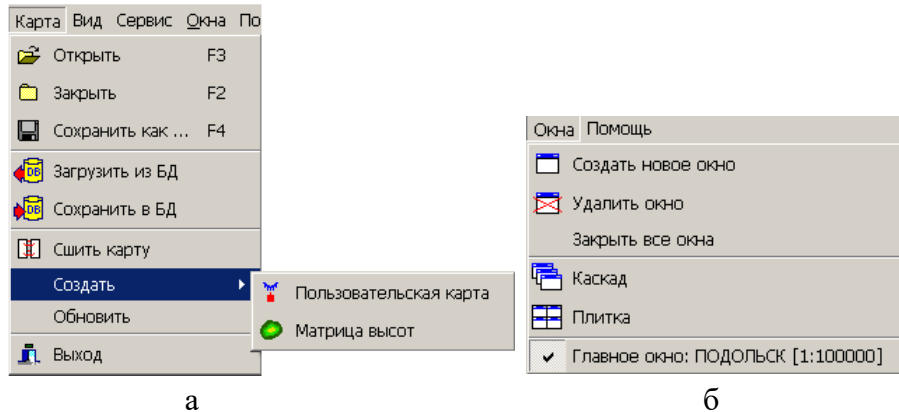


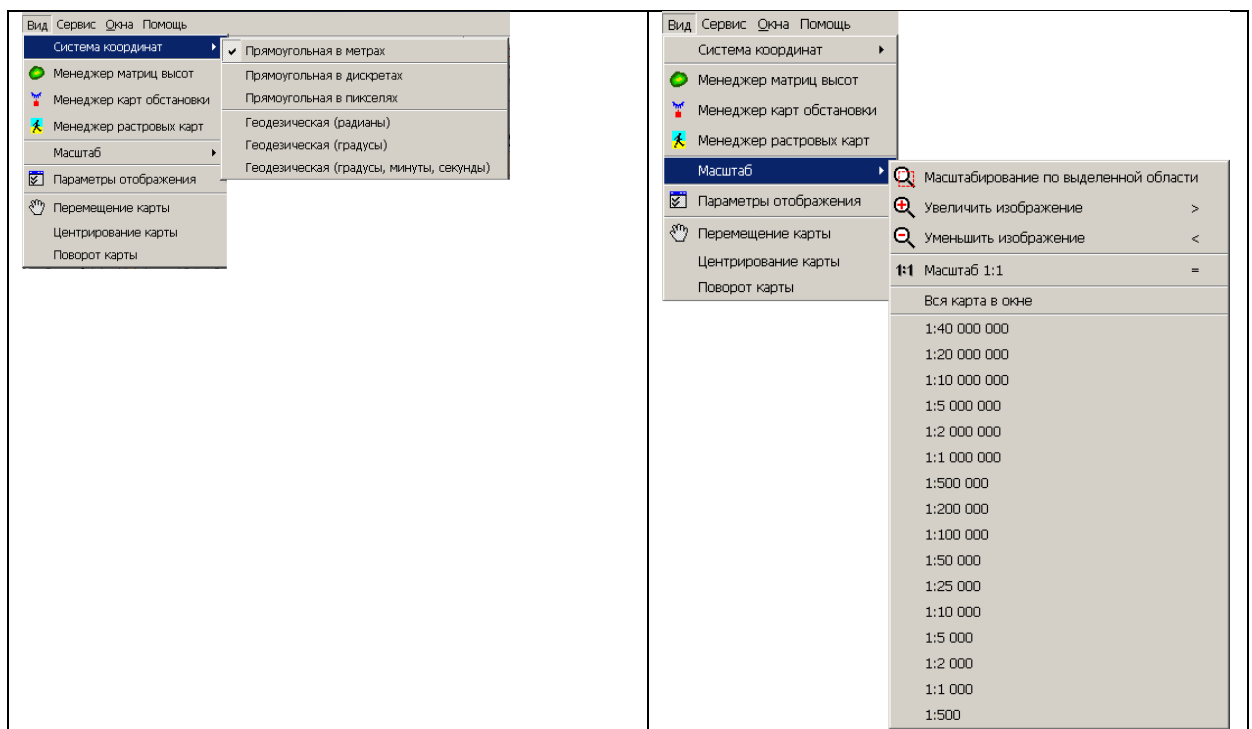
Рис. Д.1. Інтерфейс ПК управління і відображення ЦКРС

Склад команд пунктів головного меню показаний на рис.Д.2, а–г).

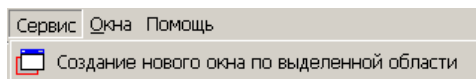


a

6



B



Г

Рис. Д.2. Головне меню: а – пункт головного меню «Карта»; б – пункт головного меню «Вікна»; в – пункт головного меню «Вид»; г – пункт головного меню «Сервіс»

Панель інструментів містить кнопки для швидкого доступу до найбільш часто використовуваних команд меню:

- кнопка «» – відкрити карту;
- кнопка «» – закрити карту;
- кнопка «» – зберегти карту;
- кнопка «» – зшити карту;
- кнопка «» – завантажити карту з БД;
- кнопка «» – зберегти карту в БД;
- кнопка «» – завантажити менеджер файлів матричної інформації;
- кнопка «» – завантажити менеджер файлів растрових карт;
- кнопка «» – завантажити менеджер файлів обстановки;
- кнопка «» – масштабувати по виділеній області;
- кнопка «» – збільшити зображення;
- кнопка «» – зменшити зображення;
- кнопка «» – встановити вихідний масштаб;
- кнопка «» – параметри відображення;
- кнопка «» – перемістити карти;
- кнопка «» – створити нове вікно по виділеній області;
- кнопка «» – створити нове вікно;
- кнопка «» – видалити вікно;
- кнопка «» – скасувати;
- кнопка «» – відновити;
- кнопка «» – допомога;

- кнопка «» – вихід.

Робоча область призначена для відображення ЦКРС.

Для відкриття картки необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Відкрити» пункту меню «Карта». Водночас на екран буде виведено діалогове вікно «Відкрити / завантажити нову карту» (рис. Д.3). У діалоговому вікні вибрати файл електронної карти (* .map або * .dir з подальшою конвертацією у формат * .map (рис. Д.4)) за допомогою «миші» або клавіш «↑» і «↓» клавіатури і натиснути кнопку «Відкрити». У разі успішного відкриття цього файлу діалогове вікно закривається, а в робочій області головного вікна ПК управління і відображення карти (рис. Д.1) з'явиться зображення електронної карти.

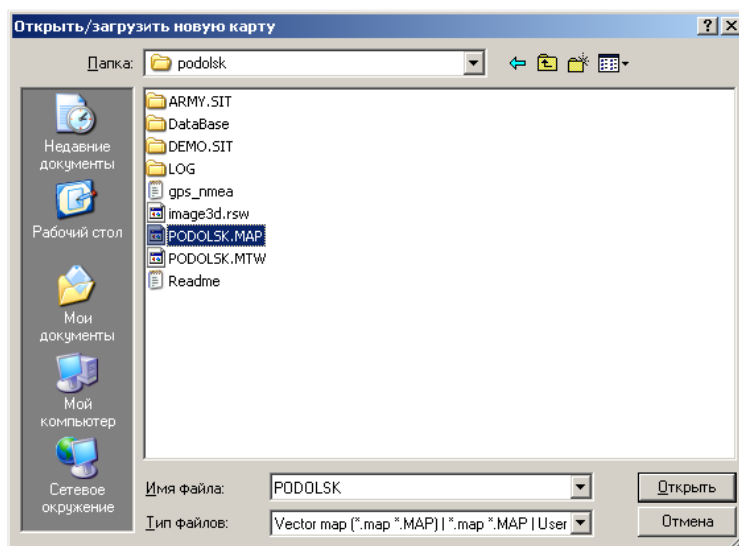


Рис. Д.3. Діалогове вікно «Відкрити / завантажити нову карту»

Натискання кнопки «Скасувати» забезпечує закриття діалогового вікна «Відкрити / завантажити нову карту».

У разі відкриття карти з подальшою її конвертацією в формат з розширенням * .map необхідно задати ім'я карти (ім'я файлу результату конвертації карти) і вибрати каталог для запису конвертованої карти за допомогою кнопки «» і натиснути «Застосувати». При натисканні кнопки «Скасувати» діалогове вікно закривається, а конвертація і відкриття карти не виконується.

Якщо карта збережена в БД, то для її відкриття необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Завантажити з БД» пункту меню «Карта». При цьому на екран буде виведено діалогове вікно «Виберіть карту» (рис. Д.5). У діалоговому вікні вибрати карту за допомогою «миші» або клавіш

Продовження додатку Д «↑» і «↓» клавіатури і натиснути кнопку «Застосувати». У разі успішного відкриття даного файлу діалогове вікно закривається, а в робочій області головного вікна ПК управління і відображення карти (рис. Д.1) з'явиться зображення електронної карти. Натискання кнопки «Скасувати» забезпечує закриття діалогового вікна.

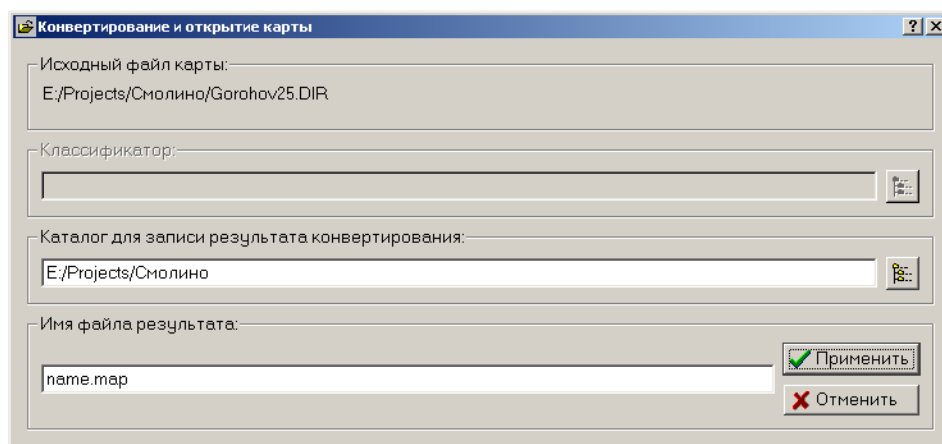


Рис. Д.4. Діалогове вікно «Конвертація і відкриття карти»

Для закриття карти необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Закрити» пункту меню «Карта».

Горизонтальна і вертикальна смуги прокручування у нижнього і правого краю вікна використовуються для перегляду тих частин ЦКМ, які не відображаються у вікні зараз.

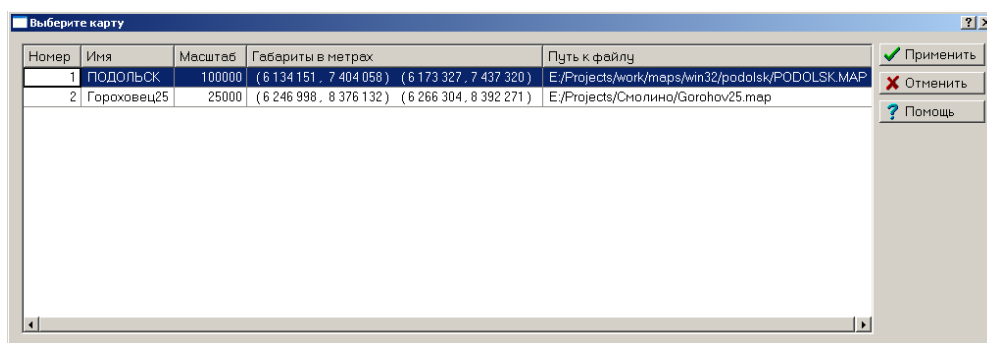


Рис. Д.5. Діалогове вікно «Виберіть карту»

Також можна увімкнути режим переміщення карти, натиснувши кнопку «» панелі інструментів. Потім встановіть курсор маніпулятора «миша» на зображення карти. Натиснувши і утримуючи ліву кнопку «миші», проведіть курсор у потрібному напрямку. Коли кнопка відтискається, або курсор «миші» не рухається, або курсор йде за межі вікна карти, переміщення карти припиняється. Для виходу з цього режиму необхідно відтиснути кнопку «».

Інформаційна панель, наведена на рис. Д.6, призначена для оперативного інформування оператора про координати точки, на яку вказує курсор маніпулятора «миша» в робочому вікні, базовому (вихідному) масштабі і масштабі поточного відображення ЦКРС, а також про найменування і тип відображуваного ЦКМ.

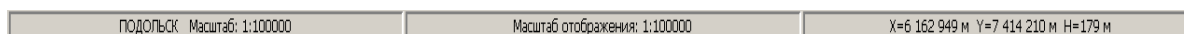


Рис. Д.6. Інформаційна панель

Для збереження карти необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Зберегти як ...» пункту меню «Карта». При цьому на екран буде виведено діалогове вікно «Зберегти карту як ...» (рис. Д.7). У діалоговому вікні задати ім'я файлу і натиснути кнопку «Зберегти». Натискання кнопки «Скасувати» забезпечує закриття діалогового вікна «Зберегти карту як ...».

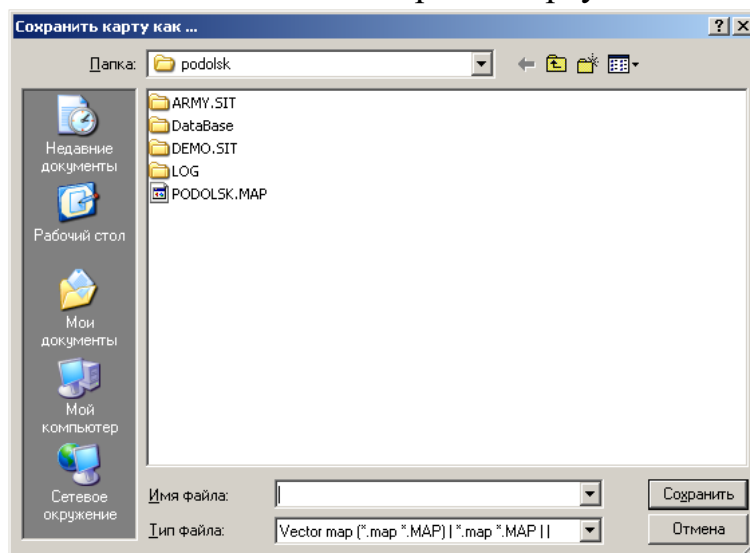


Рис. В.7. Діалогове вікно «Зберегти карту як ...»

Для збереження карти в БД необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Зберегти в БД» пункту меню «Карта».

Для додавання і видалення файлів матричної інформації необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Менеджер матриць висот» пункту меню «Файл». Водночас на екран буде виведено діалогове вікно «Менеджер файлів матриць висот» (рис. Д.8).

При натисканні кнопки «Додати» необхідно у відчиненому вікні вибрати файл матричної інформації для відкритої електронної карти (*.mtw). У разі успішного відкриття цього файлу на екрані до зображення електронної карти додається зображення рельєфу місцевості. В іншому разі буде видане відповідне повідомлення.

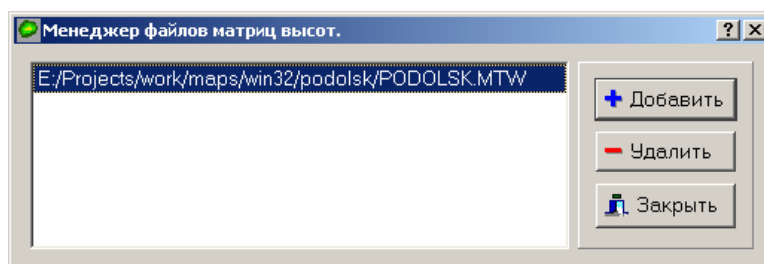


Рис. Д.8. Діалогове вікно «Менеджер файлів матриць висот»

Для видалення файлу матричної інформації необхідно вибрати потрібний файл у списку відкритих файлів за допомогою «миші» або клавіш «↑» і «↓» клавіатури і натиснути кнопку «Видалити». Водночас цей файл віддаляється зі списку і з зображення карти.

Натискання кнопки «Закрити» забезпечує закриття діалогового вікна «Менеджер файлів матриць висот».

Робота з менеджером карт обстановки (рис. Д.9) і менеджером файлів растрових карт (рис. Д.10) аналогічна роботі з менеджером файлів матриць висот.

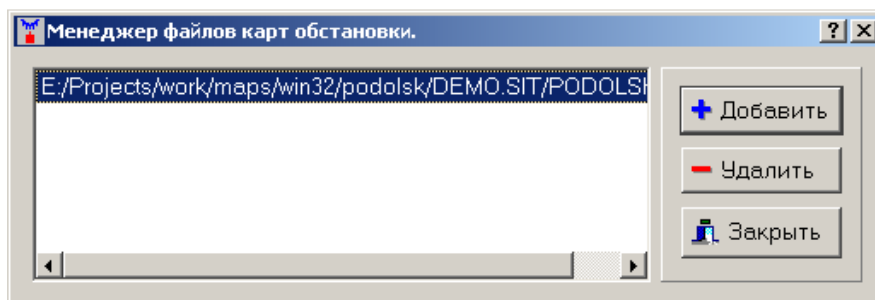


Рис. Д.9. Діалогове вікно «Менеджер карт обстановки»

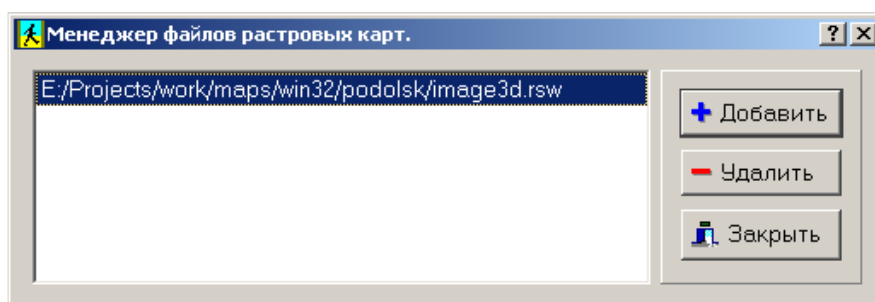


Рис. Д.10. Діалогове вікно «Менеджер файлів растрових карт»

Для налаштування параметрів (властивостей) відображення карти необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Параметри відображення» пункту меню «Вид».

На сторінці «Карта» задаються налаштування параметрів карти (рис. Д.11): яскравість і контрастність; коефіцієнт масштабування.

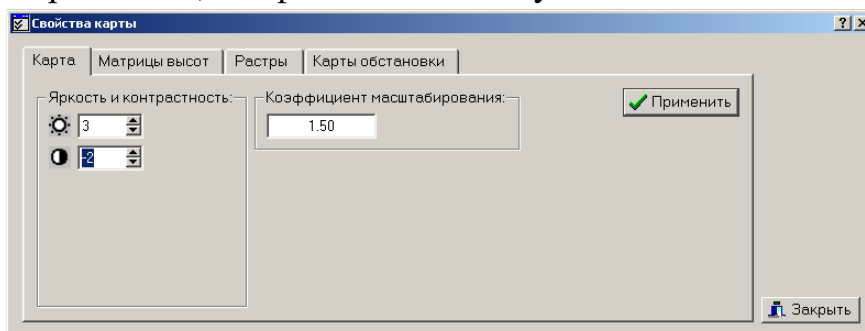


Рис. Д.11. Діалогове вікно налаштування параметрів відображення карти

На сторінках «Матриці висот» (рис. Д.12) і «Растри» (рис. Д.13) задаються налаштування параметрів карти матриці висот і растрів: яскравість і контрастність; порядок відображення; ступінь видимості.

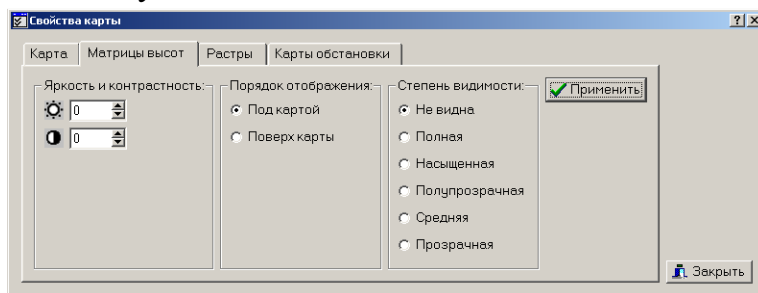


Рис. Д.12. Діалогове вікно налаштування параметрів відображення матриці висот

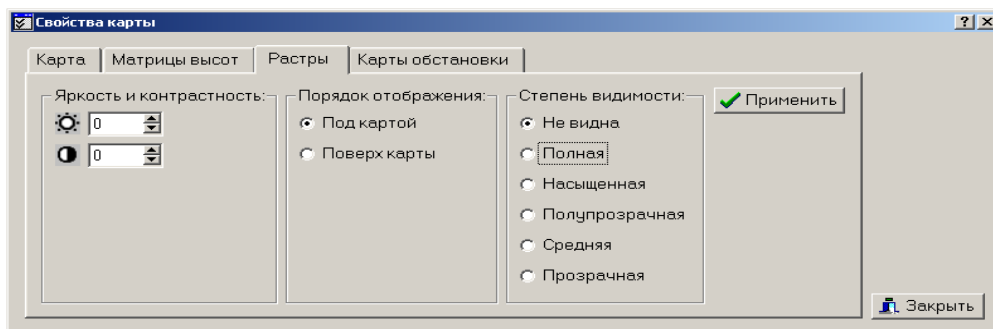


Рис. Д.13. Діалогове вікно налаштування параметрів відображення растрів

На сторінці «Карти обстановки» (рис. В.14) задаються налаштування яскравості і контрастності карти обстановки.

При натисканні кнопки «Застосувати» здійснюється застосування обраних параметрів відображення карти для поточної сторінки.

Натискання кнопки «Закрити» забезпечує відмову від застосування обраних налаштувань параметрів відображення карти. Після цього відбувається закриття діалогового вікна «Властивості карти».

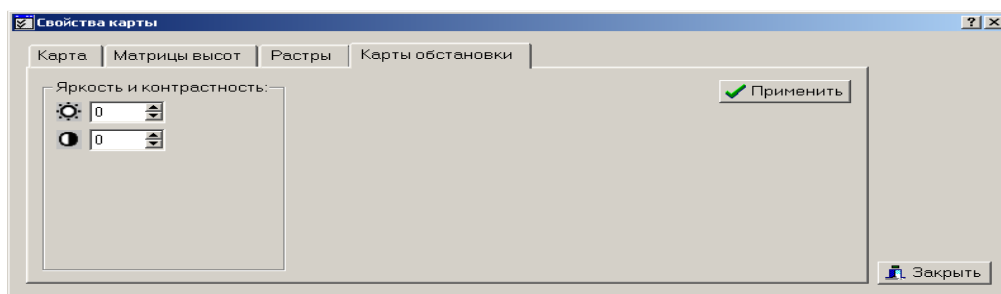


Рис. в.14. Діалогове вікно налаштування параметрів відображення карти обстановки

Щоб увімкнути режим зменшення зображення карти, необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Зменшити зображення» пункту меню «Масштаб» у пункті головного меню «Вид».

Так само зменшити зображення карти можна за допомогою масштабування по виділеній області. Натиснути послідовно кнопки «» і «» і виділити область масштабування. Для виходу з цього режиму необхідно відтиснути кнопку «» або повторно вибрати команду «Масштабування по виділеній області» пункту меню «Масштаб» в пункті головного меню «Вид».

Щоб включити режим збільшення зображення карти, необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Збільшити зображення» пункту меню «Масштаб» у пункті головного меню «Вид».

Так само збільшити зображення карти можна за допомогою масштабування по виділеній області. Натиснути послідовно кнопки «» і «» і виділити область масштабування. Для виходу з цього режиму необхідно відтиснути кнопку «» або повторно вибрати команду «Масштабування по виділеній області» пункту меню «Масштаб» у пункті головного меню «Вид».

Для відображення карти в вихідному (базовому) масштабі необхідно натиснути кнопку «» панелі інструментів або вибрати команду «Масштаб 1: 1» пункту меню «Масштаб» в пункті головного меню «Вид».

Щоб у вікні перегляду було видно всю карту, необхідно вибрати команду «Вся карта у вікні» пункту меню «Масштаб» у пункті головного меню «Вид». При цьому масштаб відображення карти зміниться так, що вона цілком відобразиться у вікні

перегляду. Для переходу до конкретного значення масштабу карти необхідно вибрати команду пункту меню «Масштаб» в пункті головного меню «Вид» з необхідним значенням масштабу відображення.

Для створення нового вікна в робочій області необхідно натиснути кнопку  » панелі інструментів або вибрати команду «Створити нове вікно» пункту меню «Вікна». При цьому на екрані відобразиться порожнє вікно, у якому можна відкрити карту описаними вище способами. Для створення нового вікна по виділеній області необхідно натиснути кнопку  » панелі інструментів або вибрати команду «Створення нового вікна по виділеній області» пункту меню «Сервис» і утримуючи ліву кнопку «миші» виділити область для відображення.

Якщо в робочій області відкрито більше однієї картки, то перемикання між вікнами здійснюється вибором (натисканням лівої кнопки «миші») відповідного вікна з пункту меню «Вікна» або розміщенням вікон каскадом вибором команди «Каскад» або плиткою вибором команди «Плитка» пункту меню «Вікна».

Для видалення вікна з робочою областю необхідно натиснути кнопку  » панелі інструментів або вибрати команду «Видалити вікно» пункту меню «Вікна». При цьому на екран буде виведено діалогове вікно «Закрити вікно» (рис. Д.15).

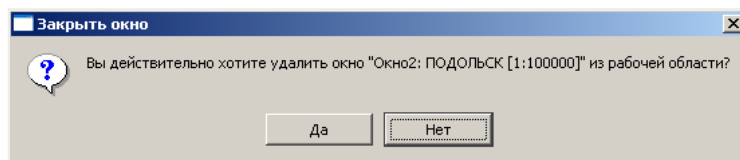


Рис. Д.15. Діалогове вікно закриття вікна

При натисканні кнопки «Так» вибране вікно віддаляється з робочої області. Натискання кнопки «Ні» забезпечує закриття діалогового вікна «Закрити вікно».

1.3. Програмний компонент завдання і редагування точки розташування наземного пункту управління польотом ДПЛА на тренажері

Призначення програми

ПК завдання і редагування точки стояння НПУ призначений для завдання і зміни координат точки стояння НПУ і відображення її на ЦКРС.

Згідно зі своїм призначенням ПК забезпечує виконання таких функцій: введення та зміна значень координат точки стояння НПУ з клавіатури; відображення значка НПУ на карті; введення та переміщення точки стояння НПУ на карті за допомогою маніпулятора «миша»; установлення точки стояння НПУ на карті за результатами топоприв'язки.

Умови виконання програми

Вихідними даними для ПК завдання і редагування точки стояння НПУ є ім'я файлу цифрової карти місцевості, значення координат точки стояння НПУ.

Виконання програми

Для завдання і редагування точки стояння НПУ необхідно натиснути кнопку  або вибрати команду «Координати НПУ» пункту головного меню «Маршрут». Унаслідок цього з'являється діалогове вікно «Координати НПУ», показане на рис. Д.16. Завдання і редагування координат НПУ можливо трьома способами: введення значень координат із клавіатури в діалоговому вікні «Координати НПУ»; за результатами топоприв'язки; за допомогою маніпулятора «миша».

Спочатку в вікні виводяться координати лівого нижнього кута карти. Координати НПУ задаються в метрах в абсолютних координатах карти. Коли вікно відкривається для редагування координат НПУ, в ньому виводяться поточні значення координат. Якщо після введення значень натиснути кнопку «Застосувати», то на карту в точку із заданими координатами буде виведена (в разі редагування координат – перенесена) піктограма НПУ , і в першій інформаційній панелі над вікном карти відобразяться введені значення.

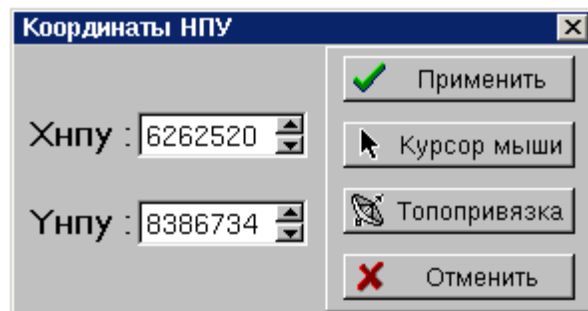


Рис. Д.16. Діалогове вікно «Координати НПУ»

Для введення або переміщення точки стояння НПУ за результатами топоприв'язки необхідно натиснути кнопку «Прив'язка». Унаслідок цього, якщо дані топоприв'язки задовольняють координати карти, піктограма НПУ відображається в місці, відповідному координатам топоприв'язки. В іншому випадку видається відповідне повідомлення.

Для введення точки стояння НПУ за допомогою маніпулятора «миша» необхідно закрити вікно «Координати НПУ», натиснувши кнопку «Курсор миші». Далі, встановивши курсор «миші» в точку на карті, яка відповідає НПУ, натиснути

ліву кнопку «миші». Водночас на карті з'явиться піктограма, що відображає положення НПУ. У цьому ж режимі, якщо точка НПУ вже встановлена, можна поставити. Для цього потрібно вибрати піктограму НПУ, встановивши на неї курсор «миші» і натиснувши ліву кнопку. Потім перемістити «миша» з натиснутою лівою кнопкою в потрібне місце карти. Коли кнопка відтискається, НПУ перемальовується в новому місці.

Натискання кнопки «Скасувати» закриває діалогове вікно «Координати НПУ» і скасовує установлення або редагування точки стояння НПУ.

Якщо для вибраної ділянки робіт відсутня матриця висот, то після завдання координат X і Y точки стояння НПУ на екран буде виведено діалогове вікно, наведене на рис. Д.17, для завдання висоти точки стояння НПУ з топографічної карти.

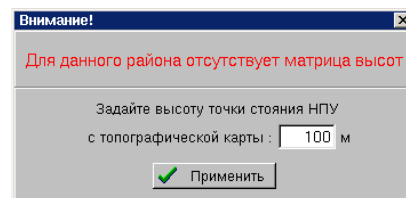


Рис. Д.17. Діалогове вікно для завдання висоти точки стояння НПУ

Якщо під час редагування координат НПУ маршрут був заданий, то він коригується щодо нових значень координат точки стояння НПУ.

Після завдання або редагування точки стояння НПУ з клавіатури або за результатами топоприв'язка встановлюється режим редагування координат НПУ за допомогою маніпулятора «миша».

Для виходу з цього режиму необхідно відтиснути кнопку «» або повторно вибрати команду «Координати НПУ» пункту меню «Маршрут».

1.4. Програмний компонент прокладання і редагування маршруту

Призначення програми

ПК прокладання і редагування маршруту призначений для розроблення і редагування маршруту на тлі ЦКРС.

У відповідності зі своїм призначенням ПКТ прокладання і редагування маршруту забезпечує виконання таких функцій: прокладання маршруту по карті за допомогою маніпулятора «миша»; автоматичне формування і відображення на карті маршруту польоту ДПЛА з урахуванням пріоритету і часу виконання завдань екологічного спостереження і напрямку вітру; редагування маршруту; перегляд

параметрів маршруту в табличному вигляді; видалення маршруту з карти; вибір маршруту з БД польотів ДПЛА і відображення його на карті.

Умови виконання програми

Вихідними даними для ПК прокладання і редагування маршруту є ім'я файлу цифрової карти місцевості, матриця висот, значення координат точки розташування НПУ, координати районів особливої уваги і об'єктів екологічного спостереження, значення швидкості і напрямку вітру.

Виконання програми

Головне вікно ПК прокладання і редагування маршруту має вигляд, показаний на рис. Д.18.

Склад команд пунктів головного меню показаний на рис. Д.19.

Панель інструментів містить кнопки для швидкого доступу до найбільш часто використовуваних команд меню:

- кнопка «» – створити маневр;
- кнопка «» – створити спеціальний маневр;
- кнопка «» – видалити маневр;
- кнопка «» – змінити маневр;
- кнопка «» – додати маневр у шлях;
- кнопка «» – вставити маневр у шлях;
- кнопка «» – видалити маневр зі шляху;
- кнопка «» – додати точку;
- кнопка «» – видалити точку;
- кнопка «» – змінити точку;
- кнопка «» – завантажити маршрут із БД;
- кнопка «» – зберегти маршрут у БД.

Можливі три способи завдання маршруту: прокладання на тлі ЦКРС за допомогою маніпулятора «миша» нового маршруту; вибір з БД польотів ДПЛА раніше розробленого маршруту і відображення його на карті для можливого подальшого редагування та використання; автоматичне формування і відображення на карті маршруту польоту ДПЛА.

Маршрут складається з пов'язаної послідовності маневрів. Маневри, своєю чергою складаються з пов'язаної групи проміжних точок маршруту, яка утворює

траєкторію маневру. Для створення маневру за допомогою маніпулятора «миша» необхідно натиснути кнопку «» або вибрати команду «Створити ...» пункту меню «Маневри». Унаслідок цього з'являється діалогове вікно «Характеристики маневру», показане на рис. Д.20.

При натисканні кнопки «Застосувати» здійснюється збереження встановлених характеристик маневру. Натискання кнопки «Закрити» забезпечує закриття діалогового вікна «Характеристики маневру». Редагування маневру передбачає такі операції: додавання проміжних точок маршруту; видалення проміжних точок маршруту ХТТ; зміна проміжних точок маршруту.

Щоб додати проміжні точки маршруту в маневр, необхідно натиснути кнопку «» або вибрати команду «Додати точку» пункту головного меню «Маневри». Унаслідок цього з'являється діалогове вікно «Характеристики ХТТ».

При натисканні кнопки «Застосувати» вікна «Характеристики проміжних точок маршруту» проводиться перевірка всіх умов і редагування маневру. За невиконання будь-якої умови видаються відповідні повідомлення. У разі виконання всіх умов проміжні точки маршруту з'єднуються прямими, утворюючи ламану лінію маршруту, і знову в вікні «Характеристики проміжних точок маршруту» виводяться значення параметрів точки вже з обчисленим мінімально допустимим значенням висоти H (за наявності матричної інформації про рельєф місцевості), які знову можна відредагувати. Кнопка «Скасувати» у діалоговому вікні «Характеристики ХТТ» закриває це вікно і скасовує редагування.

Для виходу з режиму додавання проміжних пунктів маршруту необхідно відтиснути кнопку «» або повторно вибрати команду «Додати точку» пункту головного меню «Маневри».

Щоб видалити пункт маршруту з маневру, необхідно натиснути кнопку «» або вибрати команду «Видалити точку» пункту головного меню «Маневри». Для виходу з режиму видалення пунктів маршруту необхідно відтиснути кнопку «» або повторно вибрати команду «Видалити точку» пункту головного меню «Маневри».

Щоб змінити пункти маршруту, необхідно натиснути кнопку «» або вибрати команду «Змінити точку» пункту головного меню «Маневри». Для виходу з режиму переміщення пункту маршруту необхідно відтиснути кнопку «» або повторно вибрати команду «Змінити точку» пункту головного меню «Маневри».

Для виходу з режиму створення траєкторії руху необхідно відтиснути кнопку  або повторно вибрати команду «Створити ...» пункту головного меню «Маневри». При розробці маршруту можна використовувати готовий маршрут з БД. Для цього необхідно натиснути кнопку  або вибрати команду «Завантажити з БД ...» пункту головного меню «Маршрут».

Під час автоматичного розроблення маршруту траєкторія маневру є спеціальною. Існують наступні типові види спеціальних траєкторій авіаційного маневру: «відрізок»; «замкнута траєкторія»; «коло»; «метелик»; «вісімка»; «змійка»; «область».

Розроблення маневру відбувається у такий спосіб: вибирається спеціальний маневр з переліку вручну або автоматично з урахуванням завдання екологічного спостереження; вводиться набір параметрів, що дозволяє побудувати траєкторію руху; автоматично відбувається побудова траєкторії руху; відбувається повне або часткове заповнення параметрів заголовка маневру; здійснюється збереження траєкторії руху.

Параметри розробленого або обраного з БД маршруту для зручності можна переглянути в табличному вигляді. Для цього необхідно натиснути кнопку  або вибрати команду «Показати в таблиці» пункту головного меню «Маршрут». В результаті цього на екрані з'явиться таблиця з параметрами проміжних пунктів маршруту.

Для видалення таблиці з екрана необхідно відтиснути кнопку  або повторно вибрати команду «Показати в таблиці» пункту головного меню «Маршрут».

Для видалення з карти маршруту на поточному каналі необхідно натиснути кнопку  або вибрати команду «Видалити» пункту головного меню «Маршрут». Після цього буде виданий запит на підтвердження видалення.

1.5. Програмний компонент збереження маршруту в БД

Призначення програми

ПК збереження маршруту в БД призначений для збереження розробленого маршруту в БД, а також, в разі розроблення маршруту для обраних завдань, для формування польотного завдання в БД для обраних завдань і цього маршруту.

Згідно зі своїм призначенням ПК логічно пов'язує завдання екологічного спостереження, розроблений маршрут, ЦКРС і польотне завдання в єдине інформаційне поле автоматизованої системи управління ДПЛА на тренажері.

Умови виконання програми

Функціонування ПК збереження маршруту у БД можливо після закінчення розроблення маршруту. Вихідними даними для ПК є ім'я файлу цифрової карти місцевості, координати точки розташування НПУ, список маневрів на маршруті.

Виконання програми

Щоб зберегти розроблений маршрут у БД, необхідно натиснути кнопку «» або вибрати команду «Зберегти в БД ...» пункту меню «Маршрут» в пункті головного меню «Завдання». Унаслідок цього видається запит на підтвердження збереження: «Ви дійсно хочете зберегти поточний маршрут в БД?».

2. Програмний комплекс «Розроблення польотного завдання»

2.1. Призначення програмного комплексу

ПК розроблення польотного завдання (ПЗ) ДПЛА екологічного спостереження забезпечує виконання таких функцій: перегляд наявних в базі даних ПЗ; редагування наявних ПЗ; створення нових ПЗ; створення нових параметрів ПЗ; збереження змін у базі даних.

2.2. Умови виконання програмного комплексу

Програмний комплекс розроблення ПЗ ДПЛА екологічного спостереження функціонує на комп'ютерах під управлінням операційних систем Windows 2000 / XP і Linux / MSVC. Для функціонування ПК в Linux-подібних системах необхідне графічне середовище X Window.

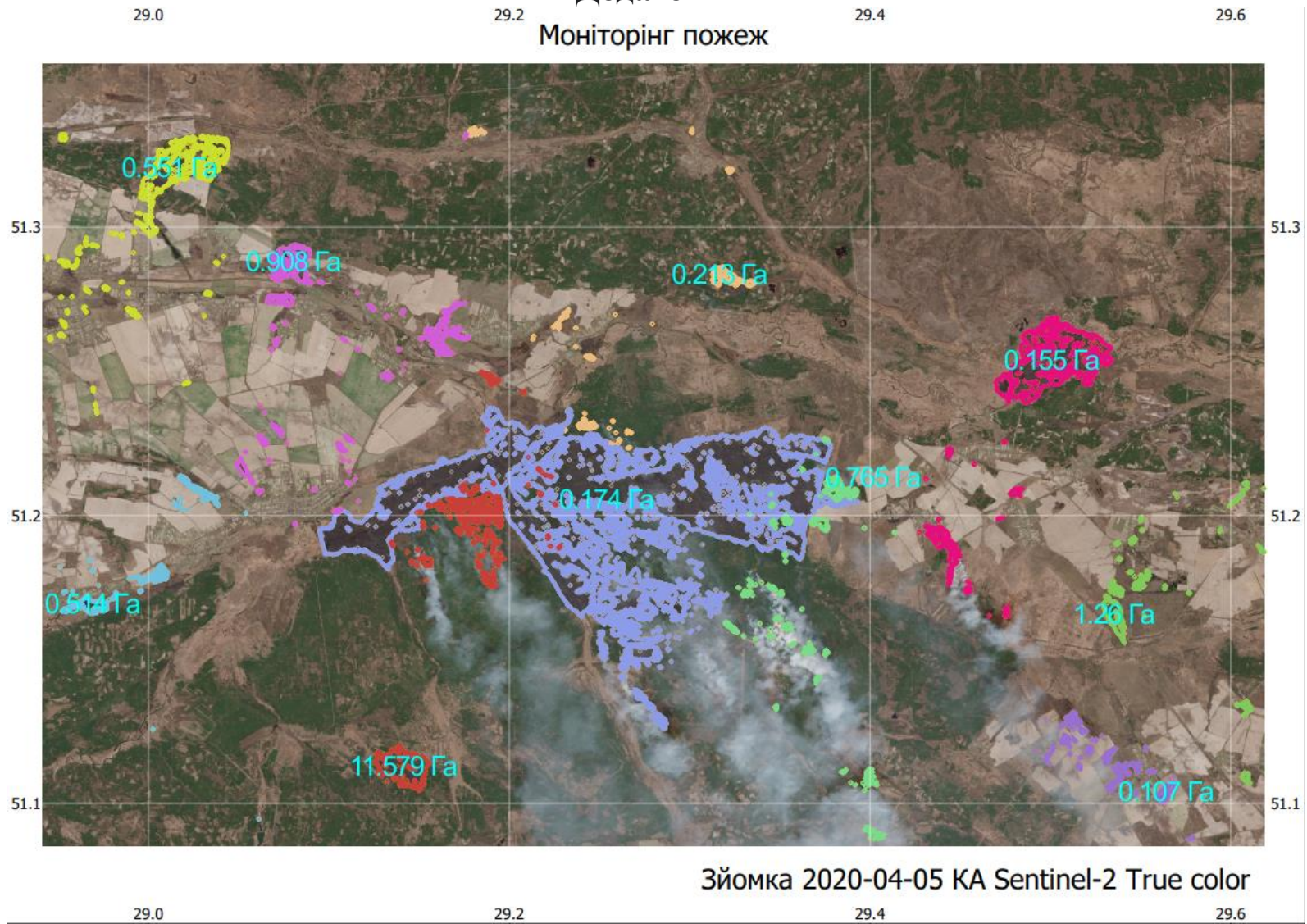
Програмний комплекс розроблено в середовищі програм Microsoft Visual C ++ 6.0 на базі бібліотек розробки додатків Qt 3.3.

2.3. Запуск програми

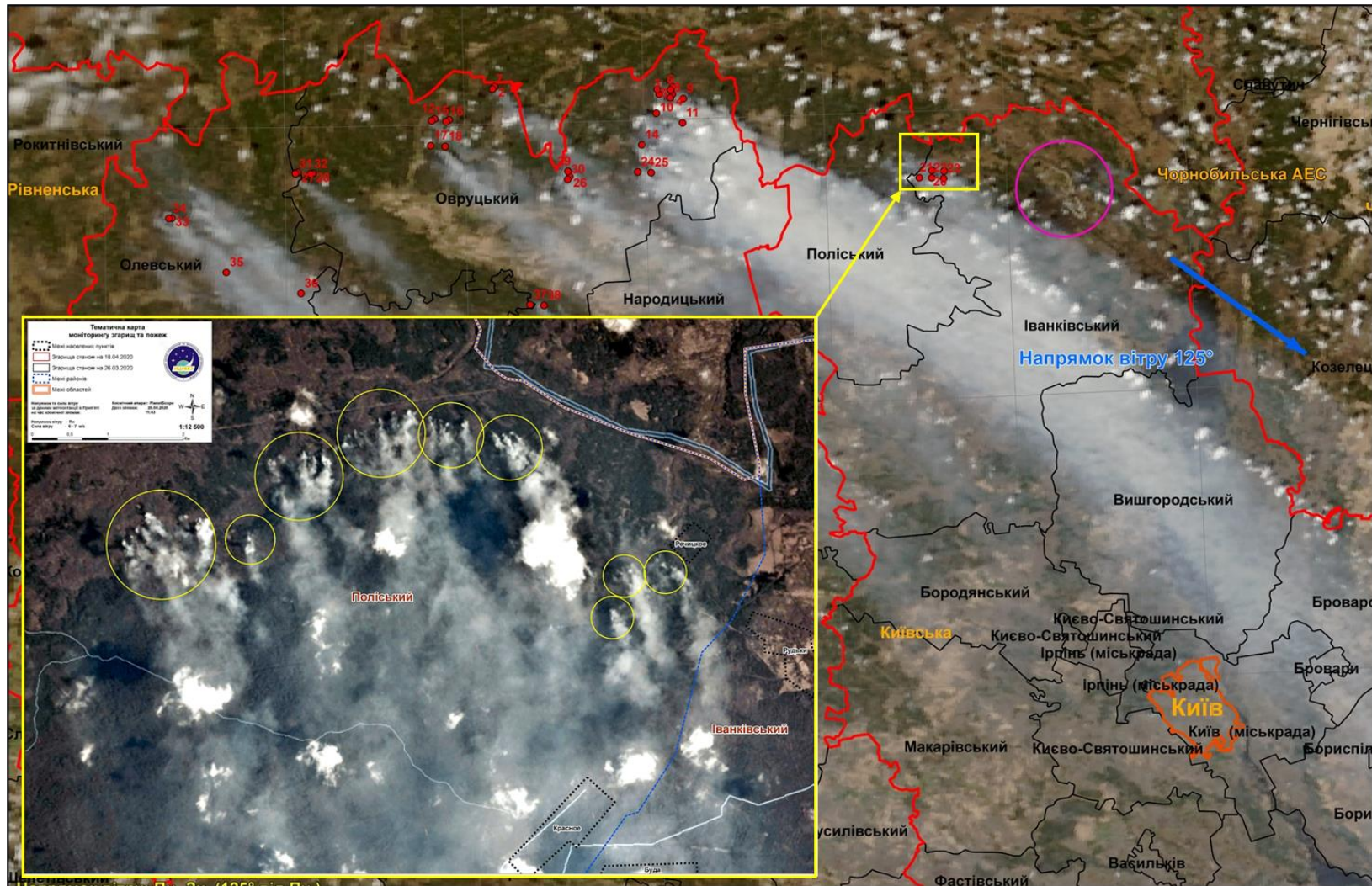
Запуск ПК розробки ПЗ ДПЛА екологічного спостереження проводиться шляхом виконання виконуваного файлу PZ_qt.

Завершення роботи ПК здійснюється натисканням стандартної кнопки «» – «Завершення роботи», яка розміщена у правому верхньому кутку основної форми ПК.

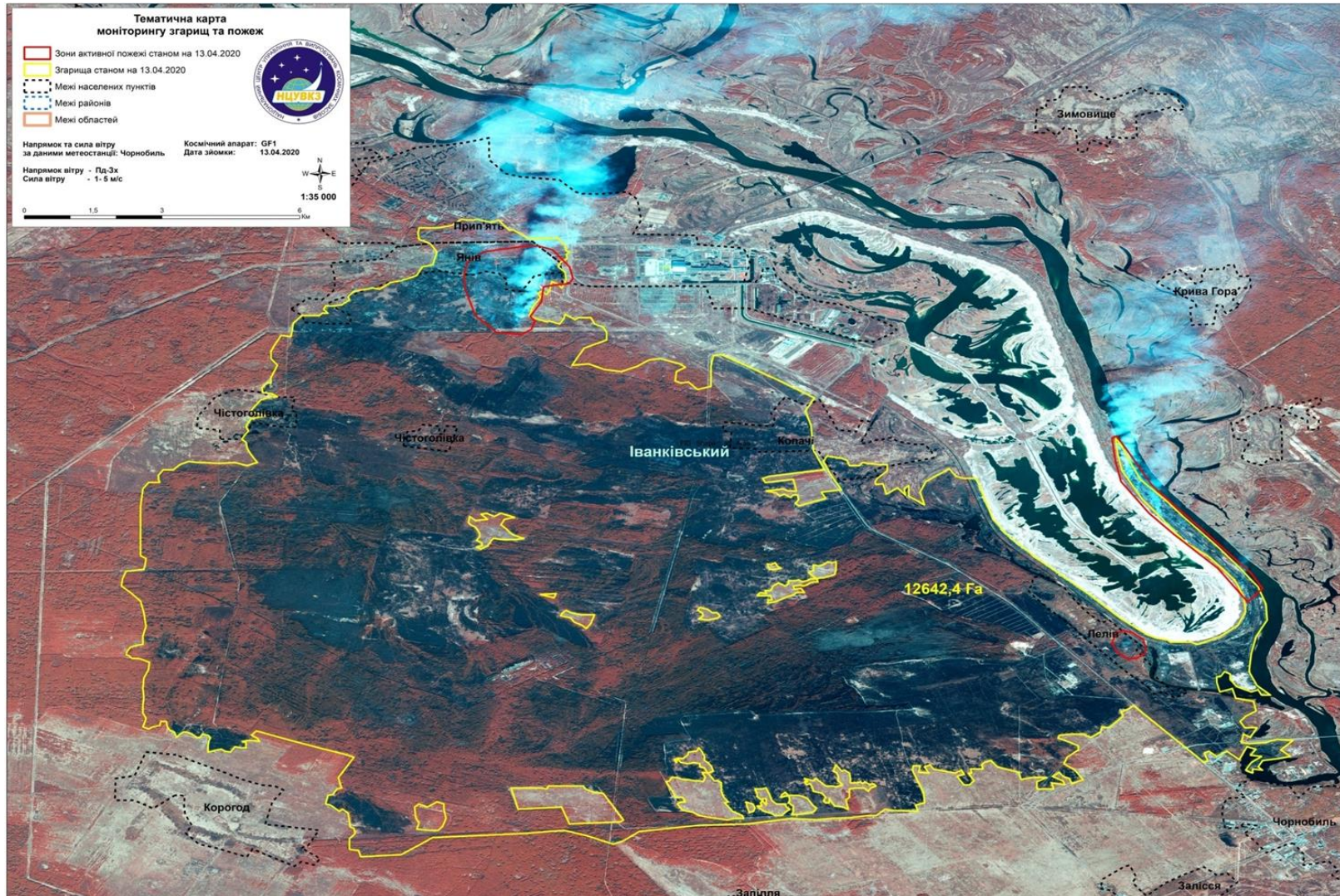
Додаток Е
Моніторинг пожеж

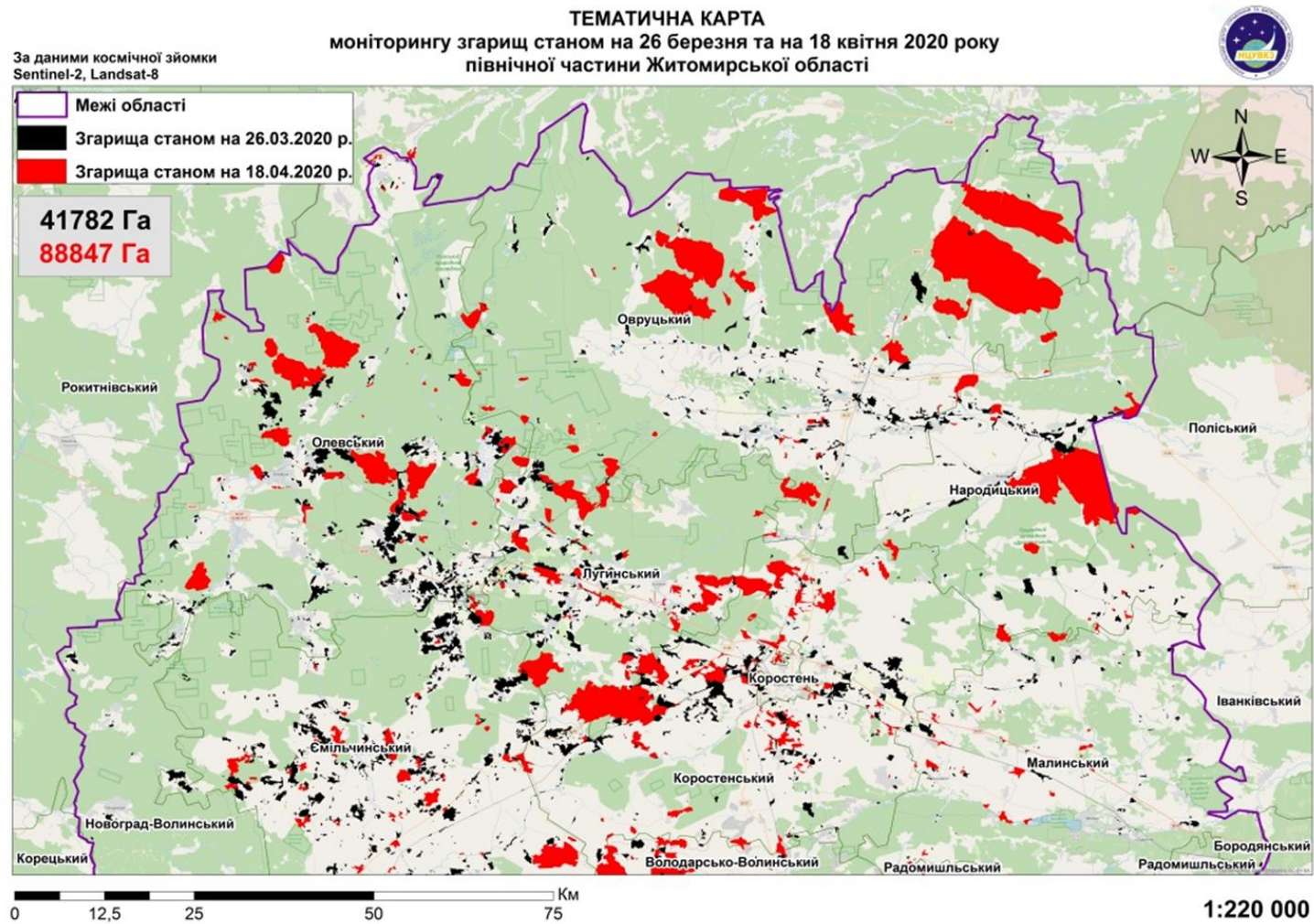


Моніторинг пожеж вздовж кордону з Білоруссю (квітень 2020 р.)



Моніторинг згарищ та пожеж поблизу Чорнобильської АЕС





НЦУВКЗ впроваджує нову систему моніторингу пожеж: інформування до 30 хв. з моменту прийому даних

Моніторинг незаконних вирубок лісу



Додаток Є

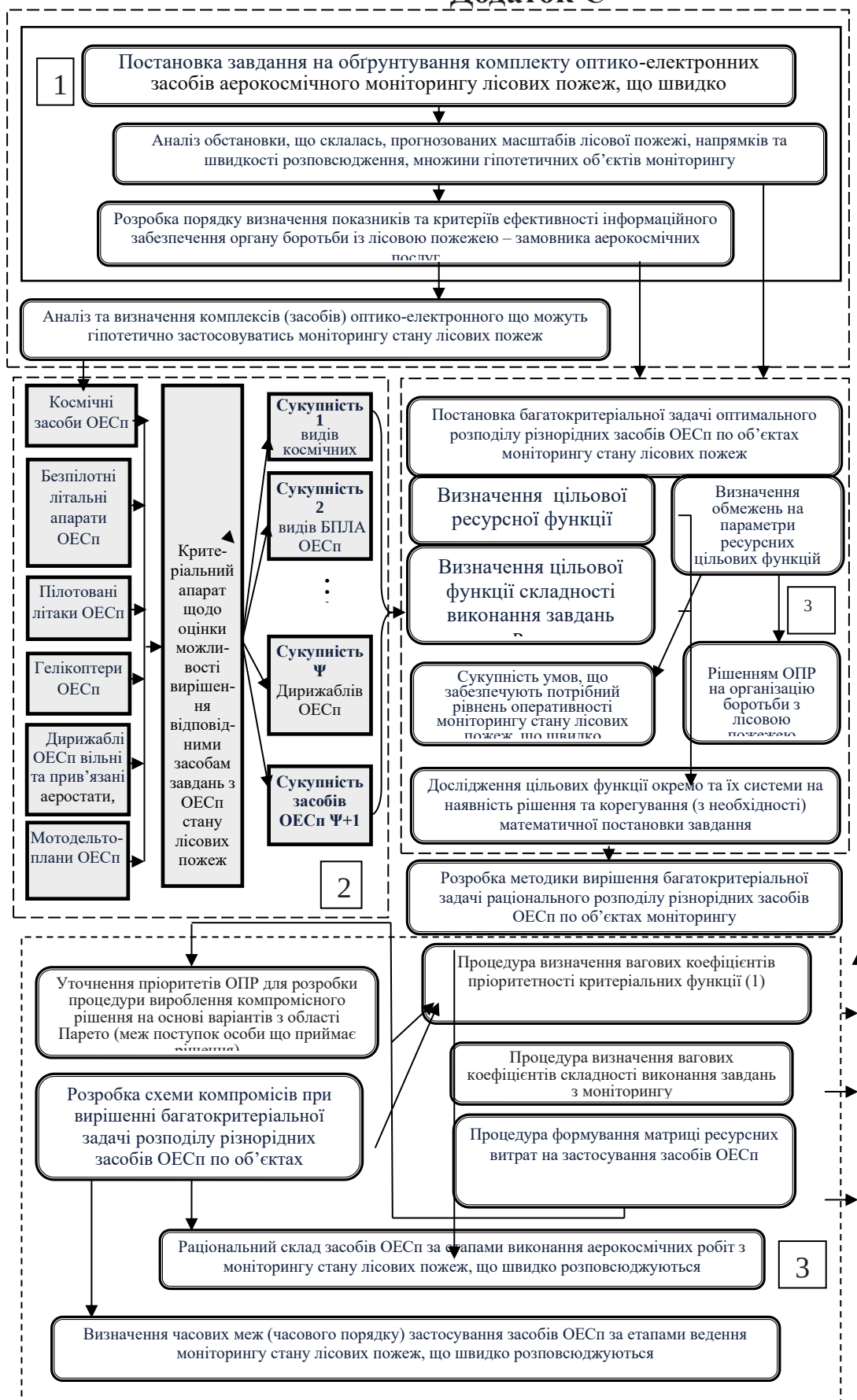


Рис. Є.1. Структурна схема методики обґрунтування комплексу засобів ОЕСп для моніторингу стану лісових пожеж

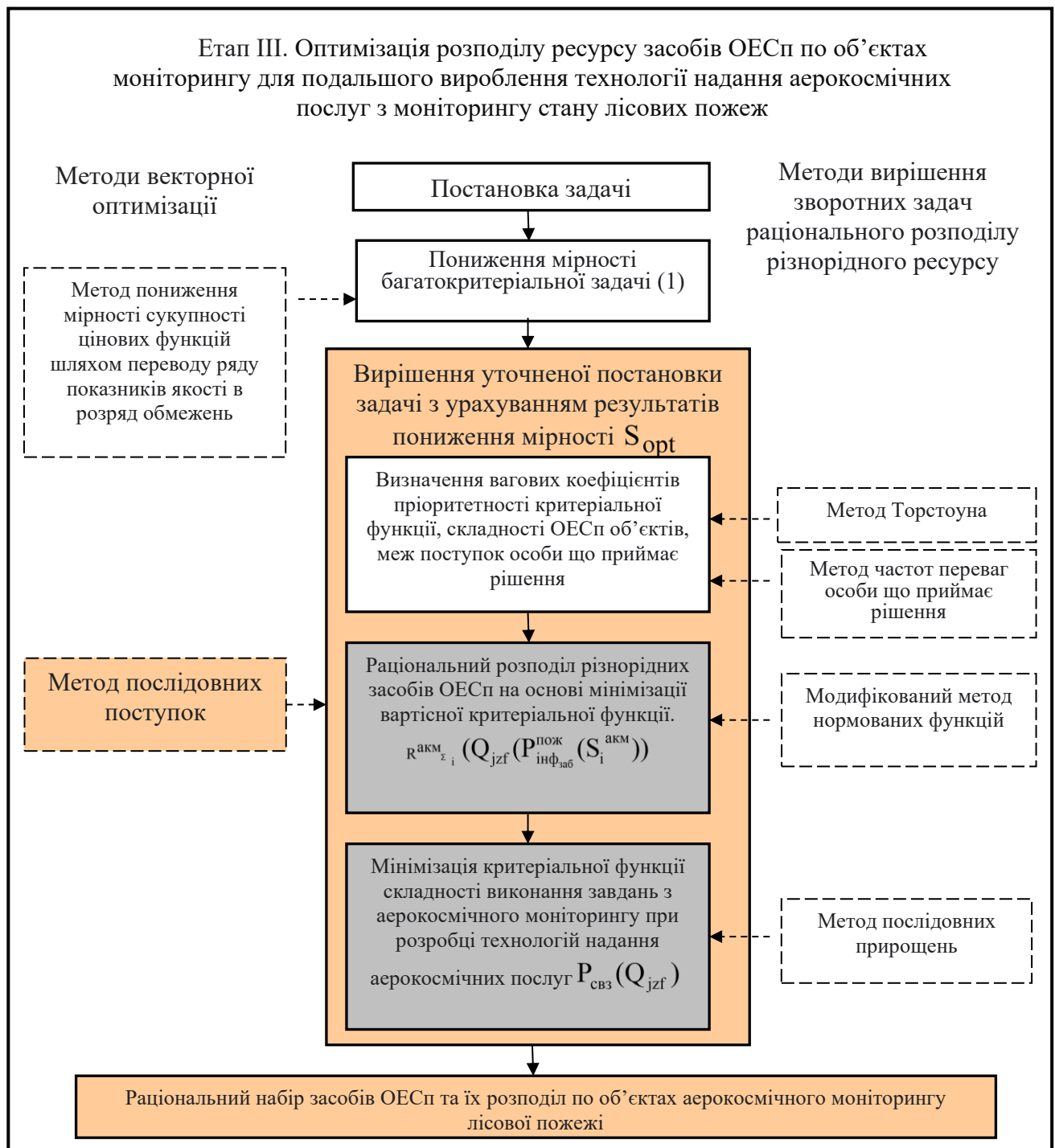


Рис. Є.2. Структурна схема етапу оптимізація розподілу ресурсу засобів ОЕСп по об'єктах моніторингу для подальшого вироблення технології надання аерокосмічних послуг з моніторингу стану лісових пожеж, що швидко розповсюджуються

Додаток Ж
УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 117211

**СПОСІБ ФОРМУВАННЯ МАРШРУТУ БЕЗПІЛОТНОГО
ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **26.06.2017**.

Директор департаменту інтелектуальної
власності Міністерства економічного
розвитку і торгівлі України

В.О. Жалдак



(11) **117211**(19) **UA**(51) МПК (2017.01)
B64C 15/00
G05D 1/00(21) Номер заявки: **u 2016 12266**(22) Дата подання заявки: **02.12.2016**(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **26.06.2017**(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **26.06.2017, Бюл. № 12**(72) Винахідники:
Кучеров Дмитро Павлович, UA,
Голенківська Тетяна Ігорівна, UA,
Жданов Сергій Васильович, UA,
Костина Олег Миколайович, UA,
Рудаков Володимир Іванович, UA,
Станіщук Андрій Богданович, UA,
Твердохлібов Володимир Віталійович, UA,
Козуб Андрій Миколайович, UA,
Бичков Антон Миколайович, UA(73) Власники:
ЦЕНТРАЛЬНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ,
Повітрофлотський просп., 28-б, м. Київ-49, 03049, UA,
Кучеров Дмитро Павлович, вул. Драгоманова, 23-б, кв. 196, м. Київ, 02068, UA

(54) Назва корисної моделі:

СПОСІБ ФОРМУВАННЯ МАРШРУТУ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

(57) Формула корисної моделі:

Спосіб формування маршруту безпілотної літальної апарата, при якому вводять в систему формування маршруту координатну інформацію через пристрій введення інформації, записують її у пам'ять пристрою формування, прив'язують ці координати до цифрової карти місцевості, розраховують за ними проміжні точки маршруту, видають проміжні точки маршруту на інтегратор та виводять їх на екран пристрою відображення через візуалізатор, який відрізняється тим, що після прив'язування введених координат до цифрової карти місцевості, розраховують проміжні координати поміж трійками просторово розподілених координатних точок, після видачі розрахованих координат на інтегратор, в системі формування маршруту забезпечують створення маршруту, а після розрахунку проміжних точок та створення маршруту, маршрут зберігають в пам'яті безпілотної літальної апарата.