ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Маршрутизація дронів для доставки вантажів на далекі відстані з оптимізацією їх траєкторій»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра (бакалавра)
зі спеціальності 126, інформаційні системи та технології
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми інформаційні системи та технології
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Тагір АХМЕДОВ
(підпис) *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача*

Виконав: здобувач(ка) вищої освіти гр. ___
Тагір Ахмедов
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: *Іван Шахматов*
науковий ступінь, вчене звання Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Рецензент: _____
науковий ступінь, вчене звання Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Інформаційних систем та технологій

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність інформаційні системи та технології

Освітньо-професійна програма інформаційні системи та технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедрою Інф. систем та технологій
Каміла ПАВЛІВНА Ім'я, ПРІЗВИЩЕ
«____» _____20___р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Ахмедов Тагір Мамедович
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Маршрутизація дронів для доставки вантажів на далекі відстані з оптимізацією їх траєкторій

керівник кваліфікаційної роботи Іван ШАХМАТОВ викладач кафедри,
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «24» березня 2025р. №56

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «30» травня 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Науково технічна література з теми бакалаврської роботи, Аналіз існуючих видів дронів, Конструкційні особливості БПЛА

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Огляд вибраних частин моделі дрона
2. Розрахунок характеристик
3. Розрахунок електро-системи

5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання «24» лютого 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	20.03.25	
2	Розділ 1. Види дронів та їх особливості	05.04.25	
3	Аналіз конструкційних деталей для реалізації проекту	17.04.25	
4	Розділ 2. Конструкція дрона	23.04.25	
5	Створення схем та розробка технічних характеристик дронів	30.04.25	
6	Розділ 3. Маршрутизація, логістика та оптимізація траєкторій дронів	6.05.25	
7	Висновки	8.05.25	
8	Оформлення дипломної бакалаврської роботи (чистовий варіант)	10.05.25	

Здобувач(ка) вищої освіти _____ Тагір АХМЕДОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник
кваліфікаційної роботи _____ Іван ШАХМАТОВ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра (магістра): 58 стор., 11 рис., 4 табл., 20 джерел.

Мета роботи – Розробка літакового БПЛА з гібридною електро системою живлення з метою швидко доставляти середні грузи на велику відстань.

Об'єкт дослідження – Дрон доставщик, здатний літати на 400 кілометрів з корисним навантаженням.

Предмет дослідження – Система гібридного електропостачання.

Короткий зміст роботи: Дослідження видів та характеристик різних дронів. Огляд складових дрона доставщика, розробка електросистеми та характеристик дрона. Маршрутизація та логістика дронів доставщиків.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДРОН, ГІБРИДНА ЕЛЕКТОРО СИСТЕМА, МАРШРУТИЗАЦІЯ

ЗМІСТ

ВСТУП.....
РОЗДІЛ 1. ВИДИ ДРОНІВ ТА ЇХ ОСОБЛИВОСТІ 9
1.1 Залежно від конструкції та принципу польоту 9
1.2 Класифікація за призначенням 11
1.3 Класифікація за типом живлення 15
1.4 Дрони на альтернативних джерелах енергії 17
РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ДРОНА. 19
2.1 Конструктивна схема та компонування 19
2.2 Матеріали та технології виготовлення 24
2.3 Силова установка 25
2.4 Аеродинамічна схема 26
2.5 Авіоніка та системи управління 26
2.6 Особливості збірки та обслуговування 27
2.7 Розташування силового пропелера 28
2.8 Загальна схема 30
2.9 Розрахунки характеристик дрона 32
2.9.1 Конфігурація енергосистеми 33
2.10 Розрахунок геометричних розмірів дрона 34
РОЗДІЛ 3. МАРШРУТИЗАЦІЯ, ЛОГІСТИКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАЄКТОРІЙ ДРОНІВ 38
3.1 Загальні засади маршрутизації дронів 38
3.2 Логістичні аспекти використання БПЛА для доставки 47
3.3 Оптимізація траєкторій польоту безпілотних літальних апаратів 49
3.4 Координація кількох дронів 54
ВИСНОВОК 60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 62
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація) 65

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку автономних технологій, зокрема безпілотних літальних апаратів (БПЛА), відкриваються нові можливості для вдосконалення логістики. Завдяки мобільності, маневреності та здатності діяти в складних або віддалених районах, дрони все активніше використовуються для доставки вантажів — від товарів до медикаментів і гуманітарної допомоги. Це особливо важливо в умовах обмеженої інфраструктури, стихійних лих або воєнних дій, коли традиційні методи перевезень малоефективні.

Паралельно з розширенням сфери застосування БПЛА постають виклики оптимізації маршрутів, енергоефективності, навігації в складному середовищі та координації багатьох апаратів. Забезпечення безпеки та стабільності систем потребує впровадження точних моделей і алгоритмів управління.

Метою даної роботи є дослідження принципів маршрутизації дронів для доставки вантажів на великі відстані шляхом оптимізації траєкторій. Розглянуто сучасні підходи до проєктування дронів, логістичних систем і математичного моделювання, зокрема із застосуванням гібридної силової установки та автономного управління.

Актуальність дослідження зумовлена глобальними тенденціями автоматизації логістики та потребою у швидких, надійних і гнучких рішеннях доставки в динамічних умовах.

РОЗДІЛ 1. ВИДИ ДРОНІВ ТА ЇХ ОСОБЛИВОСТІ

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), також відомі як дрони, являють собою передову технологію, яка активно впроваджується в різні сфери людської діяльності. Від розваг і послуг з доставки до військових операцій, моніторингу екологічного стану та проведення рятувальних місій, їх застосування є вкрай багатогранним. Завдяки стрімкому розвитку сучасних технологій дрони стали доступними для широкого загалу, що сприяло їх інтеграції в промислові процеси, наукові дослідження та логістичні рішення. Ці пристрої відрізняються своєю конструкцією, функціональними завданнями, типом енергоживлення та технічними параметрами, забезпечуючи широке поле для адаптації до потреб користувачів.

1.1 Залежно від конструкції та принципу польоту

Дрони поділяють на три основні типи: мультикоптери, апарати літакового типу та гібридні моделі. Кожен із цих видів має свої характерні переваги й недоліки, що визначають їхню придатність для певних сфер використання.

Мультикоптери є найпоширенішим типом безпілотників, які завоювали значну популярність як серед любителів, так і серед професіоналів. Ці пристрої оснащені кількома гвинтами (зазвичай від чотирьох до восьми), що забезпечують вертикальний зліт, високу маневреність та стабільність під час польоту.

Особливості мультикоптерів:

1. Зручність конструкції та керування. Завдяки впровадженим автоматичним системам стабілізації та інтуїтивно зрозумілому управлінню, такі пристрої ідеально підходять навіть для новачків.
2. Здатність зависати у повітрі. Ця функція робить їх незамінними для фото та відеозйомки, а також для моніторингу чи спостереження за певними об'єктами.

3. Обмежений час польоту. Через інтенсивне споживання енергії акумулятора, більшість мультикоптерів можуть літати від 15 до 45 хвилин, залежно від їхньої моделі та технічних характеристик.
4. Різноманітні галузі використання. Ці апарати знаходять застосування в аерозйомці, інспекції споруд чи інфраструктури, транспортуванні невеликих вантажів, аграрному спостереженні та пошуково-рятувальних операціях.
5. Різноманітність моделей. Серед найпоширеніших конфігурацій виділяються квадрокоптери (4 гвинти), гексакоптери (6 гвинтів) і октокоптери (8 гвинтів). Вони забезпечують високу стабільність у польоті та збільшену вантажопідйомність.

Дрони літакового типу, відомі також як безпілотні літальні апарати (БПЛА) з фіксованими крилами, мають конструкцію, що нагадує традиційні літаки. Їхнє функціонування потребує виконання розбігу для зльоту або ж застосування катапульти, однак завдяки високій аеродинамічній ефективності такі дрони здатні долати значні відстані.

Особливості дронів літакового типу:

1. Велика дальність польоту. Завдяки оптимальному використанню енергії пристрої здатні долати сотні кілометрів без необхідності дозарядки.
2. Знижене енергоспоживання в порівнянні з мультикоптерами. Це робить їх придатними для тривалих завдань, таких як спостереження за лісовими масивами, виконання агроаналітичних досліджень та моніторинг кордонів.
3. Необхідність злітно-посадкової смуги. Через відсутність функції вертикального зльоту у більшості моделей потрібен спеціально обладнаний майданчик для запуску та посадки.
4. Обмежена маневреність. У порівнянні з мультикоптерами такі апарати не здатні зависати в повітрі на місці.
5. Ефективне застосування в картографії, геодезії та військовій сфері. Можливість охоплювати значні території за один виліт робить їх незамінними для аерофотозйомки та створення топографічних карт.

Гібридні безпілотні літальні апарати є інноваційним технічним рішенням, яке інтегрує переваги обох основних типів мультикоптерів і літаків. Завдяки своїй конструкції вони здатні виконувати вертикальний зліт і посадку, що забезпечує зручність використання в обмежених просторах. Після завершення етапу зльоту ці апарати можуть переходити до горизонтального польоту, що сприяє значному зниженню енергетичних витрат під час тривалих місій.

Особливості гібридних дронів:

1. Поєднання унікальних можливостей. Дрони цього типу поєднують вертикальний зліт без потреби в злітно-посадкових смугах із ефективним горизонтальним польотом на значні відстані.
2. Триваліший час автономної роботи. Завдяки раціональнішому використанню енергії порівняно з мультикоптерами, гібридні дрони демонструють більшу ефективність у тривалих місіях.
3. Складність конструкції та вища вартість. Інтеграція двох типів двигунних систем обумовлює ускладнений дизайн і, відповідно, збільшує витрати на розробку та виробництво таких пристроїв.
4. Широка сфера застосування: військова справа, логістика, моніторинг. Ці моделі ідеально підходять для доставки у важкодоступні райони, спостереження за місцевістю та виконання розвідувальних завдань.

1.2 Класифікація за призначенням

Дрони знайшли застосування у багатьох сферах людської діяльності, виконуючи найрізноманітніші завдання. Вони класифікуються на кілька основних категорій залежно від призначення. Кожен вид дрона володіє специфічними характеристиками, що забезпечують його ефективність у конкретній галузі.

Споживчі дрони це безпілотні літальні апарати орієнтовані на широку аудиторію та користуються значним попитом серед шанувальників сучасних технологій, фотографів, блогерів і поціновувачів аерозйомки.

Особливості:

1. Легкі у використанні – зручне й інтуїтивне управління, наявність автоматичних режимів польоту та систем стабілізації значно спрощують експлуатацію.
2. Ключові можливості: створення аерофото та відеоматеріалів, розважальні польоти та участь у змаганнях із дрон-рейсингу.
3. Обмежена тривалість автономності – час польоту зазвичай складає від 15 до 45 хвилин, залежно від ємності акумулятора.
4. Компактні та легкі – невеликі розміри спрощують транспортування та забезпечують зручне зберігання.
5. Високоякісні камери – більшість дронів обладнані стабілізованими камерами, здатними записувати відео у форматі 4K.
6. Різноманітність цін – на ринку представлені як доступні бюджетні моделі, так і професійні дрони із розширеним набором функцій.

Промислові дрони використовуються в різних галузях промисловості для автоматизації процесів, моніторингу та аналізу стану інфраструктури, збирання даних.

Особливості:

1. Висока вантажопідйомність дозволяє транспортувати різноманітне обладнання, зокрема тепловізори, спектральні камери, LiDAR, а також датчики для аналізу забруднення повітря.
2. У сфері будівництва такі дрони застосовуються для створення 3D-карт, моніторингу стану об'єктів та оцінки якості виконаних робіт.
3. Агродрони активно використовуються у сільському господарстві для контролю стану посівів, розподілу добрив та боротьби зі шкідниками.
4. Для моніторингу енергетичної інфраструктури дрони забезпечують інспекцію ліній електропередач, нафтових платформ і газопроводів.
5. Автоматизовані польоти налаштовуються заздалегідь, що дозволяє їм виконувати завдання без участі оператора.

Військові дрони створені для реалізації специфічних військових завдань, таких як проведення розвідки, здійснення спостереження, надання тактичної підтримки та забезпечення ефективного виконання бойових операцій.

Особливості:

1. Розвідувальні дрони виконують збір інформації та забезпечують моніторинг території в реальному часі.
2. Бойові дрони оснащуються системами озброєння і служать для високоточних ударів по визначених цілях.
3. Дрони-камікадзе призначені для одноразового використання: вони самознищуються при зіткненні, руйнуючи заданий об'єкт.
4. Дрони для ведення електронної війни призначені для глушіння зв'язку противника і нейтралізації ворожих радарів.
5. Автономні системи управління дозволяють дронам працювати незалежно від оператора, використовуючи алгоритми штучного інтелекту для прийняття рішень.

Рятувальні та медичні дрони мають ключове значення для здійснення гуманітарних та рятувальних операцій, забезпечуючи підтримку лікарям, рятувальникам і екстреним службам у їх роботі.

Особливості:

1. Швидка доставка медичних препаратів забезпечує транспортування вакцин, медикаментів та донорської крові у важкодоступні райони, сприяючи оперативному наданню допомоги.
2. Рятувальні операції дозволяють за допомогою тепловізорів визначати місцезнаходження зниклих людей і передавати їхні координати рятувальним службам.
3. Повітряний моніторинг застосовується при стихійних лихах, таких як пожежі, землетруси чи повені, для детальної оцінки масштабу та стану ситуації.
4. Оснащення спеціальними пристроями, включаючи сирени, гучномовці та сигнальні маячки, використовується для привернення уваги та координації постраждалих.

5. Перевезення дефібриляторів здійснюється деякими моделями, які оперативно доставляють автоматичні дефібрилятори до місця зупинки серця, значно скорочуючи час надання невідкладної медичної допомоги.

Логістичні дрони стрімко набирають популярність у сфері електронної комерції та поштових послуг, забезпечуючи швидку доставку невеликих вантажів.

Особливості:

1. Автономна навігація – здатні здійснювати польоти за заздалегідь встановленими маршрутами без необхідності ручного управління.
2. Висока швидкість доставки – суттєво зменшують час транспортування в порівнянні зі звичайними видами транспорту.
3. Обмежена вантажопідйомність – основне призначення полягає у перевезенні невеликих вантажів, зазвичай масою до 5-10 кг.
4. Доставка у важкодоступні місцевості – ефективно долають віддалені чи складні для наземного транспорту райони.
5. Екологічність – працюють на електричних акумуляторах, що сприяє зниженню шкідливих викидів у навколишнє середовище.

Науково-дослідні та космічні безпілотні літальні апарати відіграють значну роль у наукових дослідженнях, зокрема у вивченні атмосферних процесів, спостереженні за природними явищами, а також у проведенні експериментів та спостережень у космічному просторі.

Особливості:

1. Метеорологічні безпілотні апарати представляють собою інноваційний інструмент для дослідження кліматичних умов, вивчення динаміки штормів та ураганів, що суттєво розширює можливості сучасної метеорології.
2. Екологічні дрони активно застосовуються для моніторингу навколишнього середовища, зокрема для визначення рівнів забруднення атмосфери, водних ресурсів і ґрунтів, сприяючи ефективнішому управлінню природними ресурсами і захисту екосистем.
3. Підводні безпілотні системи слугують важливим технічним засобом у сфері океанографії, надаючи можливість досліджувати морські глибини, аналізувати

їхній біологічний і геологічний склад, а також проводити пошуки затонулих об’єктів.

4. Космічні дрони, які розробляються зусиллями космічних агентств, таких як NASA, відіграють ключову роль у вивченні інших небесних тіл. Яскравим прикладом є апарат *Ingenuity*, що успішно виконує місію на Марсі, відкриваючи можливості для подальших планетарних досліджень.

Класифікація дронів за їхнім призначенням допомагає глибше осягнути їх функціональні можливості та значення в сучасному світі. Вони не лише стають двигуном технологічного розвитку, але й активно беруть участь у розв'язанні критично важливих суспільних питань.

1.3 Класифікація за типом живлення

Дрони поділяються не лише за особливостями конструкції чи сферою використання, але й за видами енергоживлення. Це ключовий фактор, що визначає їхню автономність, вантажопідйомність, екологічну складову та витрати на експлуатацію. Основними джерелами енергоживлення для безпілотників є електричні батареї, двигуни внутрішнього згоряння, гібридні установки та альтернативні енергетичні системи.

Дрони на електричних батареях є найбільш поширеними серед сучасних дронів. Для забезпечення роботи двигунів та електронних компонентів такі апарати здебільшого застосовують акумулятори на основі літій-іонних (Li-Ion) або літій-полімерних (Li-Po) технологій.

Особливості:

1. Екологічність передбачає мінімальний вплив на довкілля завдяки відсутності шкідливих викидів у атмосферу.
2. Знижений рівень шуму забезпечує тихішу роботу у порівнянні з традиційними двигунами внутрішнього згоряння, такими як бензинові чи дизельні.

3. Обмежена тривалість автономної роботи: середній час польоту варіюється від 15 до 60 хвилин залежно від потужності акумулятора та ступеня навантаження.
4. Швидке поповнення енергії: більшість моделей оснащені функціями швидкої зарядки або можливістю оперативної заміни батарей.
5. Обмежена вантажопідйомність: через низьку енергоємність акумуляторів такі пристрої не призначені для перевезення великогабаритних чи важких вантажів.

Дрони з двигунами внутрішнього згоряння які використовують бензин або дизельне паливо, що дозволяє їм здійснювати польоти набагато довше, ніж електричні моделі. Однак, вони також мають певні недоліки.

Особливості:

1. Висока автономність: здатні залишатися в повітрі годинами без необхідності дозаправки.
2. Підвищена вантажопідйомність: мають можливість транспортувати важке обладнання чи об'ємні вантажі.
3. Підвищений рівень шуму: характерний гучний звук, що може створювати проблеми в деяких ситуаціях, наприклад, у військових операціях або під час рятувальних робіт.
4. Вплив на екологію: менш екологічно сприятливі через значні викиди продуктів згоряння палива.
5. Складність обслуговування: потребують постійного й ретельного технічного контролю двигуна та паливної системи.

Гібридні дрони комбінують електричні акумулятори з двигунами внутрішнього згоряння, що забезпечує вигоди обох технологій. Це дає змогу досягти тривалого часу польоту разом із високою ефективністю електроприводу.

Особливості:

1. Збільшена енергоефективність: оснащення дронів двигуном внутрішнього згоряння дозволяє здійснювати підзарядку акумуляторів безпосередньо під час польоту, знижуючи залежність від зовнішніх джерел енергії.

2. Універсальність застосування: такі дрони можуть працювати як на електроенергії, так і на рідкому паливі, адаптуючись до специфічних умов експлуатації та забезпечуючи більшу гнучкість у використанні.
3. Скорочене споживання палива: порівняно з повністю бензиновими моделями, ці дрони витрачають менше пального, зменшуючи негативний екологічний вплив і підвищуючи ефективність ресурсозатрат.
4. Складність конструкції: інтеграція двох енергетичних систем створює складнішу інженерну архітектуру, що вимагає більш ретельного технічного обслуговування та відповідного рівня кваліфікації персоналу.

1.4 Дрони на альтернативних джерелах енергії

Інноваційні проекти в галузі безпілотних літальних апаратів дедалі частіше зосереджуються на впровадженні альтернативних джерел енергії, зокрема водню, сонячних панелей і компактних ядерних реакторів.

Водневі безпілотні літальні апарати оснащені водневими паливними елементами, які значно перевищують традиційні акумуляторні батареї за рівнем енергетичної ефективності.

Особливості:

1. Тривалий час автономного польоту – водневі паливні елементи дозволяють виконувати польоти значно довше порівняно з електричними системами, забезпечуючи суттєве збільшення тривалості роботи.
2. Підвищена енергоефективність – завдяки високій щільності енергії водню такі системи генерують більшу кількість енергії при значно меншій масі, що є ключовою перевагою для широкого спектра застосувань.
3. Екологічна чистота – водневі паливні елементи не створюють шкідливих викидів, оскільки єдиним продуктом їхньої роботи залишається вода, що робить їх привабливим варіантом із перспективою сталого розвитку.

4. Складність у масовому впровадженні – висока вартість виробництва та експлуатації таких систем наразі обмежує їхню доступність і впливає на швидкість інтеграції у промислові та споживчі сфери.

Сонячні дрони використовують сонячні панелі для накопичення енергії, що дозволяє їм працювати протягом дуже тривалого часу без необхідності дозарядки. Особливості:

1. Максимальна автономність – ці пристрої здатні залишатися в повітрі протягом кількох днів або навіть тижнів, забезпечуючи тривалу безперервну роботу.
2. Обмежена швидкість і потужність – через недостатній запас енергії вони не можуть транспортувати значні вантажі, що знижує їх функціональні можливості.
3. Погодна залежність – продуктивність значно знижується за умов хмарності або в темний час доби, що обмежує їх ефективність у несприятливих атмосферних умовах.

Ядерні дрони є найбільш інноваційними та технічно складними в реалізації є безпілотні апарати, що використовують мікроядерні реактори як джерело енергії.

Особливості:

1. Значна автономність. Такі апарати здатні функціонувати безперебійно протягом багатьох місяців або навіть років, що робить їх ідеальними для довготривалих місій.
2. Чутлива до вартості технологія. Мікроядерні реактори перебувають на етапі науково-технічного розвитку, що зумовлює їхню надзвичайно високу ціну.
3. Посилені вимоги до безпеки. Через можливість радіаційного забруднення будь-яке пошкодження такого дрона несе серйозну небезпеку для довкілля та суспільства.

Отже, вибір джерела енергії для безпілотного апарата визначається його функціональним призначенням, необхідним рівнем автономності, екологічними стандартами та економічною обґрунтованістю.

РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ДРОНА.

Розділ присвячений аналізу конструкції безпілотного літального апарата літакового типу з гібридною силовою установкою, розробленого для перевезення малих і середніх вантажів на великі дистанції. У контексті постійного зростання потреби в автономних засобах доставки, особливо на територіях із важким доступом або низькою щільністю населення, створення подібних дронів має високий ступінь актуальності. Гібридна силова установка забезпечує збалансованість між тривалістю польоту, екологічною ефективністю та вантажними можливостями, що робить цю технологію перспективним рішенням у сфері повітряної логістики.

2.1 Конструктивна схема та компонування

Базова конфігурація апарата включає:

Рис. 2.1 Фюзеляж літакового типу обтічної форми

Фюзеляж є центральною частиною конструкції, що нагадує корпус традиційного літака. Саме тут розташовані ключові компоненти: двигун, електроніка, акумуляторні системи, вантажний відсік, а також кріплення для крил і хвостового оперення.

Обтічна форма служить для зменшення повітряного опору під час польоту. Вона характеризується плавними контурами без різких виступів, напівзакругленими переходами, схожими за обрисами на краплю або сигару. Така конструкція мінімізує турбулентність, покращує аеродинамічні властивості апарата і сприяє економії енергії.

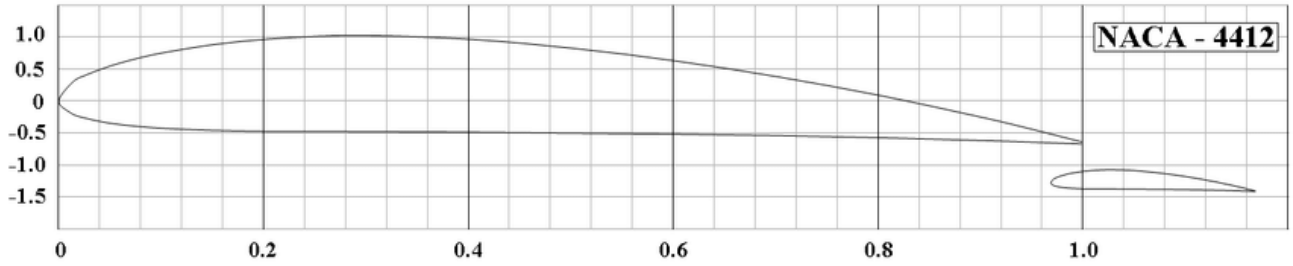


Рис. 2.2 Моноблочне крило прямої геометрії з профілем типу NACA 4412

Моноблочне крило являє собою цілісну конструкцію, виготовлену без роздільних елементів або з мінімальною кількістю з'єднань. Така конструкція сприяє збільшенню міцності та знижує масу виробу, що має ключове значення для досягнення високої жорсткості та оптимальної аеродинамічної ефективності.

Пряма геометрія крила передбачає відсутність стрілоподібної форми, що характеризується розташуванням передньої кромки, яка проходить строго перпендикулярно до осі фюзеляжу. Конструкція такого типу широко застосовується в авіаційних апаратах з низькою крейсерською швидкістю, таких як легкомоторні або навчальні літаки, завдяки її здатності забезпечувати високий рівень стабільності та передбачуваності під час управління.

Профіль NACA 4412 — це стандартний аеродинамічний профіль, розроблений Національним консультативним комітетом з аеронавтики США (NACA). Цифри "4412" означають:

4% максимального вигину профілю, розташованого на 40% хорди від передньої кромки.

12% від довжини хорди — максимальна товщина профілю.

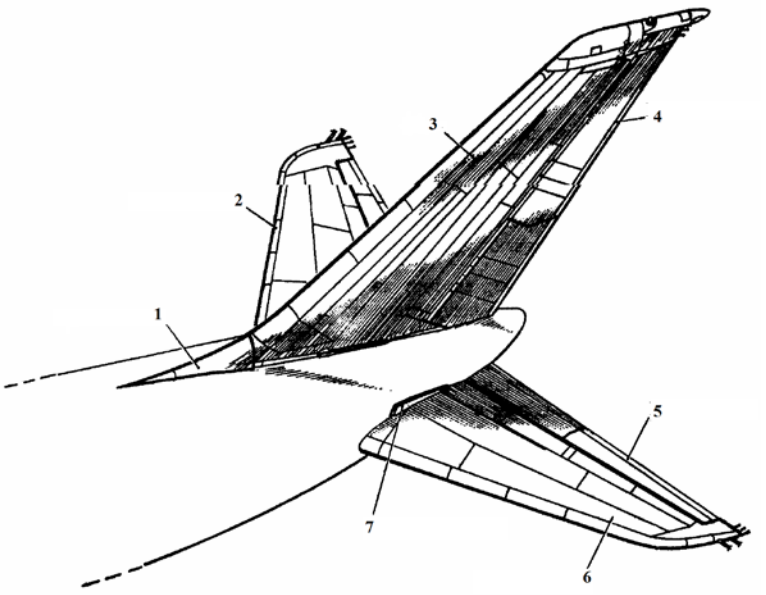


Рис. 2.3 Хвостове оперення з елементами стабілізації

На зображенні представлено класичне хвостове оперення у Т-подібній конфігурації, яке виконує функції стабілізації та керування польотом безпілотного літального апарата. Вертикальне оперення складається з кільового стабілізатора, що забезпечує напрямну стійкість, а також рухомої поверхні — керма напрямку. Горизонтальні стабілізатори виконують роль балансування та стабілізації по тангажу, а також містять кермо висоти, що забезпечує зміну кута атаки апарата.

Рис. 2.4 приклад літака з з триопорною схемою розміщення шасі

На зображенні зображено триопорну конструкцію шасі, яка включає дві основні передні опори та одну задню опору. Така конфігурація відповідає класичній велосипедній схемі, що широко застосовується в безпілотних літальних

апаратах із переднім тяговим гвинтом. Передні стійки мають підвищену довжину, що забезпечує достатній кліренс між землею та гвинтом. Задня опора є коротшою та виконує функцію стабілізації фюзеляжу під час руління, зльоту та посадки.

Малюнок 2.5 Електродвигун

Зображено безщітковий електродвигун (BLDC), що використовується як основний рушій у гібридній силовій установці дрона. Він забезпечує тягу з високою ефективністю, плавним регулюванням обертів і низьким рівнем шуму.

Рис. 2.6 Двигун внутрішнього згоряння

Зображено компактний бензиновий ДВЗ, що використовується для живлення генератора в складі гібридної силової установки безпілотного апарата. Забезпечує автономність і збільшення дальності польоту.

Рис. 2.6 Генератор

Зображено генератор, що перетворює механічну енергію від ДВЗ на електричну для живлення електродвигуна та підзарядки акумулятора дрона.

Рис. 2.7 Акумулятор

Зображено літій-іонний акумулятор, що виконує функцію резервного джерела живлення та забезпечує енергію на стартових, пікових або аварійних етапах польоту.

Рис. 2.8 Навігаційно-керуючий модуль

На зображенні представлено навігаційно-керуючий модуль, що є центральною частиною бортової електроніки дрона. До його складу входять високоточний автопілот, інерціальна вимірювальна система (IMU), супутниковий приймач GPS/GLONASS, барометричний датчик висоти, а також модулі телеметрії та засоби зв’язку із наземною станцією управління (GCS). Автопілот виконує функції стабілізації, орієнтації в просторі, автоматичного зльоту та посадки, а також навігації за попередньо заданим маршрутом. Інерційна система забезпечує оцінку кутових та лінійних прискорень, що дозволяє тримати стабільну траєкторію навіть у разі втрати GPS-сигналу. Завдяки інтеграції всіх систем, модуль дозволяє досягти високої автономності та безпеки польоту в різних умовах.

Рішення зупинитися на літаковому компонуванні продиктоване прагненням досягти максимальної енергоефективності та забезпечити стабільну аеродинаміку під час польотів на великі відстані.

2.2 Матеріали та технології виготовлення

Конструкція планера розроблена з акцентом на використанні сучасних композитних матеріалів, серед яких ключову роль відіграє карбонове волокно. Цей матеріал забезпечує відмінне співвідношення міцності до маси, високу стійкість до впливу зовнішніх агресивних чинників і мінімальні деформації під дією навантажень.

Додаткові елементи, включаючи кріплення, внутрішні балки та компоненти шасі, виготовляються з авіаційних алюмінієвих сплавів марки 7075-T6. Вони характеризуються високою ударною міцністю та чудовою стійкістю до корозії. Для створення обшивки фюзеляжу застосовуються легкі полімерні композити або ABS-пластик. Ці матеріали вирізняються простотою обробки та достатньою термостійкістю, що робить їх оптимальними для даних завдань.

2.3 Силова установка

Однією з ключових переваг представленої конструкції є впровадження гібридного приводу, який дозволяє вдало поєднувати сильні сторони бензинового двигуна внутрішнього згоряння (висока енергетична щільність пального) та електродвигуна (тихохідність, плавна робота, миттєва реакція на зміну навантаження).

Основні компоненти системи:

1. Бензиновий ДВЗ, компактний двигун.
2. Генератор: перетворює механічну енергію від ДВЗ в електричну.
3. Без щітковий електродвигун (BLDC): виступає основним рушієм системи.
4. Літій-іонний акумулятор: резервне джерело живлення, що підтримує систему на стартових і фінальних етапах роботи.

Принцип роботи передбачає постійну генерацію електроенергії під час горизонтального польоту. Частина цієї енергії накопичується в акумуляторі, а решта йде на безпосереднє живлення пропелера, забезпечуючи ефективну та стабільну роботу системи.

2.4 Аеродинамічна схема

Крило виконане у формі прямокутника з плавно заокругленими кінцівками, що сприяє зменшенню індуктивного опору. Його профіль являє собою або симетричну конструкцію, або має невелике викривлення, яке допомагає досягти оптимальної підйомної сили на малих швидкостях.

Фюзеляж поступово звужується до хвостової частини, створюючи сприятливі умови для стабільного напрямку потоків повітря. Хвостове оперення буде виконане у традиційному Т-подібному стилі.

2.5 Авіоніка та системи управління

Авіоніка дрона-доставника є ключовим елементом, який забезпечує точну навігацію, стабільне керування та скоординовану роботу всіх систем літального апарата. Завдяки сучасним мікроконтролерним платформам і комунікаційним модулям можна досягати повністю автономного функціонування дрона в різноманітних кліматичних умовах і географічних зонах.

Основні компоненти авіоніки:

1. Автопілот: Побудований на відкритих програмно-апаратних платформах, таких як Pixhawk 4 чи Cube Orange. Він забезпечує режими стабілізації, утримання висоти, навігації за заданими маршрутами, автоматичного зльоту та посадки, а також аварійного повернення на стартову точку (Return-to-Launch).
2. IMU (Інерціальна вимірювальна система): Використовує акселерометри, гіроскопи та магнітометри для високоточної оцінки положення дрона у просторі.
3. GPS-модуль: Приймач із підтримкою систем GPS/GLONASS, що дозволяє досягти точності позиціювання до 2 метрів або до 10 см у RTK-версіях.
4. Барометр: Служить для визначення висоти, аналізуючи тиск повітря.

5. Датчики повітряної швидкості (трубка Піто): Надають критично важливі дані для динамічної стабілізації польоту.
6. Телеметрія: Виконується через модулі зв'язку на частотах 433/915 МГц або LTE-модеми, що забезпечують обмін інформацією між дроном і наземною станцією управління (Ground Control Station).
7. Камера або FPV-система: Додатковий модуль для відеоспостереження та керування польотом у реальному часі.

Програмне забезпечення. Зазвичай використовується Mission Planner, QGroundControl або інші GCS-програми з підтримкою MAVLink-протоколу. Завдяки цьому оператор має змогу:

1. задавати місії,
2. відстежувати телеметрію,
3. вносити коригування в режимі реального часу,
4. отримувати попередження про несправності.

2.6 Особливості збірки та обслуговування

Конструкція дрона базується на модульному підході, що істотно полегшує його складання, налаштування та обслуговування. Кожен основний компонент, включно з силовою установкою, електронікою та планером, розроблено як окремий модуль. Це дозволяє швидко замінювати або оновлювати будь-який із блоків без необхідності розбирати весь пристрій.

Основні характеристики конструкції це швидкоз'ємні з'єднання. Вони забезпечують легке підключення кабелів живлення, керування та телеметрії, що значно спрощує процес монтажу, обслуговування та діагностики системи.

Монтаж силових модулів: Електродвигун і генератор закріплені на антивібраційних кронштейнах, що забезпечує стабільність роботи. Для встановлення чи демонтажу використовуються звичайні інструменти, такі як шестигранні ключі.

Обслуговування батареї: Акумуляторна батарея розміщена в окремому термозахищеному відсіку з вентиляцією. Доступ до неї забезпечується через люк зі знімною кришкою, що полегшує технічне обслуговування.

Знімні крила: Кріпляться за допомогою спеціальних фіксаторів із защіпками або штифтами, що дозволяє швидко демонтувати їх для зручного транспортування дрона в розібраному стані.

Регламентне обслуговування охоплює:

1. контроль цілісності корпусу, крила та оперення,
2. оцінку стану акумуляторів і роз'ємів,
3. оновлення програмного забезпечення автопілота,
4. калібрування інерційного вимірювального блоку (IMU) та системи GPS-позиціонування.

Завдяки модульній конструкції, легкому доступу до основних вузлів та мінімізації використання рідкісних або складних у виготовленні деталей, процес обслуговування є максимально простим і ефективним.

2.7 Розташування силового пропелера

У конструкції представленого дрона-доставника літакового типу передбачено встановлення пропелера на передній частині фюзеляжу, тобто у його лобовій зоні. Такий компоновочний підхід вважається традиційним для безпілотників малого та середнього класу і має низку суттєвих переваг як у технічному, так і в аеродинамічному аспектах.

Основні аргументи на користь переднього розташування пропелера включають:

1. Покращене охолодження двигуна

   Завдяки зустрічному потоку повітря пропелер забезпечує додаткову вентиляцію для двигуна внутрішнього згоряння або електромотора. Це дозволяє ефективно підтримувати оптимальну температуру силової установки, усуваючи потребу у складних охолоджувальних системах.
2. Стабільність у польоті

Переднє розташування гвинта сприяє рівномірному розподілу тягового зусилля вздовж поздовжньої осі апарата. Це помітно зменшує крутильні моменти та вібрації, що позитивно впливає на точність управління і забезпечує кращу стабілізацію під час польоту.

3. Мінімізація впливу турбулентності

   Розташування пропелера позаду часто призводить до його взаємодії з турбулентними потоками, які виникають за кромкою фюзеляжу. Проте переднє розташування дозволяє уникнути цього ефекту, зберігаючи рівномірний і стійкий аеродинамічний потік через лопаті.

4. Зручність технічного обслуговування

   Простий доступ до двигуна та пропелера, розміщених у передній частині дрона, значно полегшує процес монтажу, демонтажу та регламентного обслуговування. Це особливо важливо у випадку роботи в польових умовах.

5. Захист вантажу та оптики

   При задньому розташуванні існує ймовірність впливу вібрацій або повітряних потоків від гвинта на камеру чи вантаж. У передньому варіанті ці рухові вібрації ізолюються від заднього відсіку фюзеляжу, де можуть бути розміщені оптика, вантаж або інші чутливі компоненти.

2.8 Загальна схема

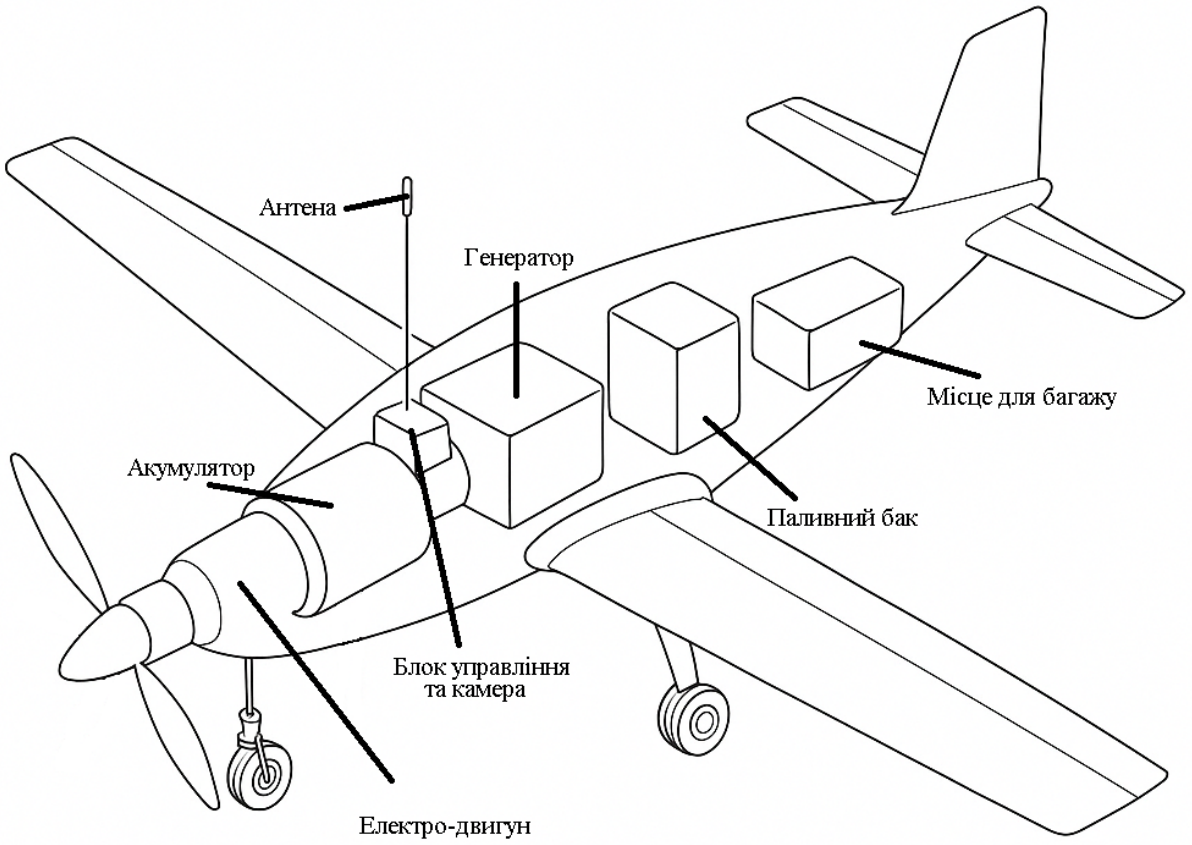


Рис. 2.9 Загальна схема компановки БПЛА

Зображена на схемі конструкційна модель безпілотного літального апарата (БПЛА) із фіксованим крилом характеризується використанням комбінованої енергосистеми. Загальне компонування відповідає класичному однодвигуновому літакові з високим розташуванням крила і триопорним шасі.

Основні функціональні елементи конструкції включають наступні компоненти:

Електродвигун, що виконує функцію основного джерела тяги. Він забезпечує приведення в дію повітряного гвинта, необхідного для підтримки горизонтального польоту.

Блок управління, що складається з ключових елементів електронної системи управління. До його складу входять контролер польоту, навігаційні модулі й обладнання для комунікації.

Акумуляторна батарея, яка служить резервуаром для накопичення електроенергії. Ця енергія споживається електродвигуном і бортовою

електронікою. Заряджання батареї можливе як від зовнішнього джерела, так і за допомогою генератора під час польоту.

Генератор, що виконує функцію перетворення енергії палива в електричну. Він забезпечує заряд акумуляторів та живлення двигуна в польоті.

Паливний бак, призначений для зберігання рідкого пального, необхідного для роботи генератора. Його обсяг обирається відповідно до вимог дальності польоту та питомої витрати палива.

Вантажний відсік, розрахований на розміщення корисного навантаження, такого як обладнання чи транспортуваний вантаж.

Камера, яка розміщується в носовій або нижній частині фюзеляжу, виконує функцію візуального моніторингу, картографування територій або забезпечення навігації. Її конструкція може бути як стаціонарною, так і рухомою, що залежить від характеру покладених завдань.

Антена, що забезпечує прийом і передачу радіосигналів, включаючи контрольні канали, телеметрію та навігацію (наприклад, GPS).

Запропонована схема поєднує переваги електричної тяги, з підвищеною автономністю завдяки використанню генератора на традиційному паливі. Така конструкція є особливо придатною для виконання середньо та далеко магістральних місій, зокрема для перевезення вантажів чи проведення моніторингових операцій.

2.9 Розрахунки характеристик дрона

Таблиця 2.1

Оцінка маси компонентів дрона

Компонент	Маса (оцінка), кг
Корисне навантаження	20
Конструкція фюзеляжу	~15–20
Крила + оперення	~8–10
Гібридна силова установка	~10–12
Паливо (бензин)	~6–8
Електроніка, камера, GCS	~1-2
Разом (оцінка)	65–75 кг

Отже, загальна злітна маса: ~70 кг

Оцінка енергоспоживання

Оцінимо споживану потужність у крейсерському режимі:

Для дронів літакового типу: 80–120 Вт/кг корисної потужності на кг маси в польоті (залежить від аеродинаміки).

Припустимо:

Крейсерська потужність: ≈ 80 Вт/кг × 70 кг ≈ 5600 Вт (5.6 кВт)

Тривалість польоту

Дальність: 400 км

Середня швидкість: 90 км/год

Час польоту ≈ 4 години та 24 хвилини

Необхідна енергія

Потужність × Час = 5.6 кВт × 4.4 год = ≈ 24.6 кВт·год

Це вся енергія, яку повинен забезпечити гібридний блок (генератор + акумулятор + ДВЗ).

2.9.1 Конфігурація енергосистеми

ДВЗ (двигун внутрішнього згоряння) — спалює паливо (бензин) — обертає генератор.

Генератор — виробляє електрику з обертання.

Акумулятор — накопичує електроенергію.

Електродвигун — приводить у рух пропелер за рахунок електрики.

Скільки енергії потрібно на весь політ?

Потрібно щоб дрон летів 400 км.

За середньою швидкістю 90 км/год, це ≈ 4.4 години польоту.

Середня потужність у польоті ≈ 5.6 кВт (тобто 5600 Вт).

За 4.4 год × 5.6 кВт = ≈ 24.6 кВт·год — стільки енергії потрібно в усьому польоті.

Частина енергії береться з акумулятора

Акумулятор може дати 3 кВт·год, тому що більший буде важкий.

Це допомагає на зльоті та посадці або як резерв.

Решту енергії генерує ДВЗ + генератор

Потрібно ще ≈ 21.6 кВт·год.

Але ДВЗ не дуже ефективний: тільки ~25% бензинової енергії перетворюється в електрику.

Тому потрібно:

21.6 / 0.25 = 86.4 кВт\год з пального

Скільки бензину потрібно?

У бензину енергетична щільність ≈ 12 кВт·год на 1 кг

Отже:

86.4 / 12 = 7.2кг бензину ≈ 10 літрів

Висновок:

Щоб дрон міг летіти 400 км із вантажем 20 кг, енергосистема має виглядати так:

Таблиця 2.2

Склад та параметри енергосистеми дрона

Компонент	**Значення**
Акумулятор	≈ 3 кВт·год (~15 кг)
Паливо (бензин)	≈ 7–8 кг (≈ 10 літрів)
Генератор	Видає 5–6 кВт потужності
ДВЗ	Потужність під генератора
Сумарна енергія	≈ 25 кВт·год

Таблиця 2.3

Підсумкові характеристики

Параметр	**Значення**
Дальність польоту	400 км
Тривалість польоту	~4.4 години
Крейсерська швидкість	~90 км/год
Корисне навантаження	20 кг
Злітна маса (оцінка)	~70 кг
Енергоспоживання в польоті	~5.6 кВт
Акумулятор	3 кВт·год (~15 кг)
Запас пального	~7.5 кг (≈ 10 літрів бензину)
Силова установка	Гібридна (ДВЗ + генератор + BLDC)

2.10 Розрахунок геометричних розмірів дрона

Розмах крила (Wingspan)

Для дронів масою 60–80 кг зазвичай використовують розмах крила 3.5–5 м. Орієнтуємося на середнє аеродинамічне навантаження:

Підіймальна сила (1)

(1)

$$L \approx W = mg,$$

Де

L — підйомна сила, створена крилом

W — вага апарата

m — маса

g — прискорення вільного падіння (приблизно 9.81 м/с²)

Це рівняння потрібно, щоб зв'язати реальну вагу дрона з формулою підйому (2):

(2)

$$L = \frac{1}{2}V^2SC_L,$$

При:

Маса: 70 кг

Крейсерська швидкість

V: 25 м/с (90 км/год)

ρ: густина повітря = 1.225 кг/м³

C_L: коефіцієнт підйому ≈ 0.8 (для профілю NACA 4412)

З формули (3):

(3)

$$S = \frac{2mg}{pV^2C_L} \approx \frac{2 \times 70 \times 9.81}{1.225 \times 25^2 \times 0.8} \approx 1.12\text{м}^2.$$

Це ефективна площа крила.

При відношенні сторін (AR) = 8 (типове для БПЛА) (4):

(4)

$$AR = \frac{b^2}{S} \rightarrow b = \sqrt{AR \times S} = \sqrt{8 \times 1.12} \approx 2.99\text{м}.$$

Розмах крила (b): ≈ 3 м

Довжина фюзеляжу

Типово для апаратів такого класу (5):

(5)

$$L_{\text{фюзеляжу}} \approx 0.7 - 0.9 \times b \rightarrow L \approx 2.2 - 2.7\text{м}.$$

Довжина фюзеляжу: ≈ 2.5 м

Ширина крила (коренева хорда) за формулою (6):

$$C = \frac{S}{b} \approx \frac{1.12}{3} \approx 0.37\text{м}. \tag{6}$$

Хорда крила (середня): ≈ 0.35–0.4 м

Таблиця 2.4

Фінальні характеристики дрона

Параметр	**Значення**
Тип апарата	Літаковий БПЛА з фіксованим крилом
Дальність польоту	~400 км
Тривалість польоту	~4.4 годин
Середня швидкість польоту	~90 км/год (25 м/с)
Корисне навантаження	20 кг
Злітна маса (оцінка)	~70–75 кг
Тип енергосистеми	Гібридна: ДВЗ + генератор + Li-ion АКБ
Потужність електродвигуна (ном.)	~7.0 кВт
Крейсерська потужність споживання	~5.6 кВт
Акумуляторний блок	~3.0 кВт·год (~15 кг)
Запас пального (бензин)	~7–8 кг (~10 л)
Сумарна необхідна енергія на місію	~25 кВт·год
Гвинт	4-лопатевий, діаметр ~1.2 м
Кліренс гвинта до землі	~20 см (за рахунок піднятого шасі)
Тип шасі	Триопорне: 2 високі передні, 1 задня
Розмах крила	~3.0 м
Площа крила	~1.2 м²
Довжина фюзеляжу	~2.5 м

Продовження таблиці 2.4

Параметр	**Значення**
Висота апарата (включно з шасі)	~1.0 м
Стабілізація	Т-подібне або класичне оперення
Автопілот	Pixhawk / Cube Orange
GCS	QGroundControl або Mission Planner
Камера / оптика	FPV/навігаційна, встановлена в носі

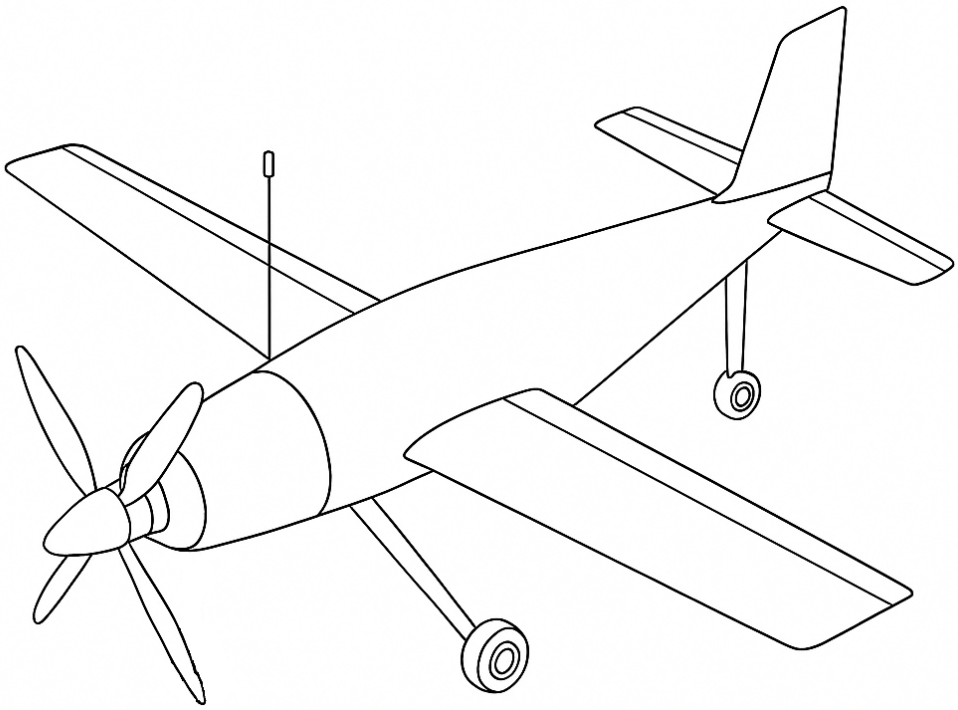


Рис. 2.10 Зовнішній вигляд дрону

РОЗДІЛ 3. МАРШРУТИЗАЦІЯ, ЛОГІСТИКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАЄКТОРІЙ ДРОНІВ

3.1 Загальні засади маршрутизації дронів

У сучасних автономних системах доставки, що використовують безпілотні літальні апарати (БПЛА), маршрутизація відіграє ключову роль у забезпеченні ефективної роботи логістичної інфраструктури. Вона включає визначення оптимального маршруту між точками відправлення і призначення з урахуванням таких аспектів, як обмеження середовища, енергетичні показники платформи, просторові параметри та питання безпеки.

Загальна постановка задачі маршрутизації БПЛА. У сфері безпілотних літальних апаратів (БПЛА) процес маршрутизації полягає у визначенні оптимального польотного шляху дрона від точки старту до пункту призначення. При цьому враховуються обмеження та умови навколишнього середовища. Завдання спрямоване на мінімізацію або оптимізацію визначених цільових критеріїв, таких як час виконання завдання, витрати енергії, пройдена відстань, рівень ризику чи баланс різних факторів. Водночас потрібно дотримуватися вимог безпеки, логістичних стандартів і технічних можливостей апарата.

Ключові аспекти маршрутизації включають:

1. Просторове середовище польоту

Польотний маршрут прокладається у тривимірному просторі, що може містити як статичні перепони (будівлі, рельєф), так і динамічні (зміни погоди, рух інших літальних апаратів). Важливими даними є геопросторові карти, межі заборонених зон для польотів (no-fly zones) і рекомендовані коридори.

2. Стартові та кінцеві точки

Це конкретні координати початку польоту та місця доставки. У певних сценаріях може бути передбачено додаткові проміжні точки, наприклад, для поетапної доставки або виконання завдань на маршруті.

3. Обмеження польоту

До ключових обмежень належать:

- Максимальна тривалість польоту, яка залежить від ємності батареї та споживаних ресурсів;
- Ліміт на вагу корисного навантаження;
- Висотні рамки для польотів;
- Метеорологічні умови, такі як сильний вітер, дощ або туман;
- Вимоги щодо точності позиціонування і стабільності в повітрі.

4. Цільова функція

Ця функція визначає мету польоту. Залежно від специфіки задачі вона може набувати таких форм:

- Скорочення тривалості або відстані маршруту;
- Зменшення енергоспоживання;
- Максимізація площі покриття (актуально для зондування або моніторингових завдань);
- Зниження ризиків, наприклад, уникнення зон із густою забудовою чи несприятливими погодними умовами.

Таким чином, задачі маршрутизації в рамках БПЛА вимагають балансування між оптимізацією ресурсів і врахуванням зовнішніх обмежень задля досягнення заданих цілей.

Типи маршрутів. У логістичних системах із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА) вибір маршруту стає ключовим фактором у забезпеченні ефективності, надійності та безпечності доставки. Від правильного маршруту залежить не лише економічна доцільність місії, але й її своєчасне виконання, оптимальне споживання енергії та зниження ризиків. Залежно від цілей польоту, характеристик середовища та технічних обмежень дронів виділяють кілька основних категорій маршрутів.

1. Фіксований маршрут

Цей варіант передбачає попередньо визначену траєкторію, що проходить через зафіксовані точки (waypoints) і не змінюється під час польоту.

Особливості:

- Використовується у стабільному середовищі з відомими перешкодами.
- Підходить для регулярних перевезень, наприклад, між складами.
- Не враховує зміни умов у реальному часі, такі як погода чи нові перешкоди.

Переваги:

- Простота реалізації.
- Передбачуваність траєкторії та рівня енерговитрат.

Недоліки:

- Низька здатність адаптації до змін.
- Зростаючий ризик зіткнень у динамічному середовищі.

2. Динамічний маршрут

Цей тип маршруту постійно коригується в реальному часі з огляду на зміни у навколишньому середовищі – наприклад, появу нових перешкод, зміну погодних умов чи повітряного трафіку.

Особливості:

- Ґрунтується на сенсорах та алгоритмах уникнення перешкод.
- Часто застосовується метод SLAM (Simultaneous Localization and Mapping).
- Підходить для маловідомих або мінливих середовищ.

Переваги:

- Висока гнучкість та здатність до адаптації.
- Знижений ризик зіткнень і втрат обладнання.

Недоліки:

- Збільшені вимоги до обчислювальної потужності.
- Стабільність системи залежить від точності сенсорів.

3. Оптимізований маршрут

Траєкторія розробляється із врахуванням певної цільової функції, наприклад, мінімізації енергоспоживання, часу доставки або ризиків, часто за

допомогою методів оптимізації – генетичних алгоритмів, динамічного програмування чи градієнтного пошуку.

Особливості:

- Орієнтований на максимізацію ефективності.
- Враховує рельєф місцевості, вагу вантажу та ємність батареї.

Переваги:

- Забезпечення максимальної продуктивності.
- Можливість багатокритеріальної оптимізації (наприклад, одночасно мінімальний час і безпечна висота польоту).

Недоліки:

- Трудомісткість реалізації.
- Необхідність точних даних і значних обчислювальних ресурсів.

4. Ітеративно-коригований маршрут

У цьому випадку початковий маршрут планується на основі наближених даних, але під час польоту постійно коригується завдяки новим даним або зворотному зв’язку з попередніх місій.

Особливості:

- Може мати змішаний підхід: частина маршруту залишається статичною, а інша адаптується до умов.
- Часто інтегрується із системами машинного навчання для самонавчання апаратів.

Переваги:

- Використання історичних даних для вдосконалення маршрутів.
- Поступова оптимізація роботи системи з кожною новою місією.

Недоліки:

- Повільне досягнення оптимального результату через ітераційний характер.
- Залежність від попереднього досвіду, що може стати застарі

Моделювання навколишнього середовища виступає важливим етапом у плануванні та оптимізації траєкторій безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Створення точного відображення фізичного світу в цифровому просторі дає змогу ефективно вирішувати завдання навігації, уникнення перешкод, управління енергоспоживанням та гарантування безпеки польоту.

Просторова репрезентація. Середовище, у якому діє дрон, представляється у вигляді просторової області з різними об'єктами та зонами, які впливають на його рух. Для цього застосовуються такі інструменти:

1. Трисимірні мапи місцевості, що деталізують топографію, будівлі, зелені насадження, мости та інші об’єкти, які можуть виступати перешкодами;
2. Цифрові моделі рельєфу (DEM), які враховують висоти поверхні.
3. Топологічні карти для ілюстрації взаємозв’язків між об’єктами та формування семантичної структури простору.
4. Окупаційні сітки, які відображають зайняті й вільні зони у двовимірному чи тривимірному просторі.

Для побудови середовищної моделі використовуються різнопланові **джерела інформації:**

1. Геопросторові дані з відкритих платформ, наприклад, OpenStreetMap.
2. Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) із супутників або за допомогою літаків.
3. Локальні сенсори дрона, такі як лідари, стереокамери чи ультразвукові/інфрачервоні датчики, що підтримують актуальність карти у реальному часі за технологіями SLAM.
4. Дані передпольотного планування для формування початкової траєкторії на основі вже наявної карти.

Динамічна актуалізація карти. Реальні умови зазвичай характеризуються динамічністю: можуть виникати тимчасові об’єкти (люди, транспорт), змінюватися погодні умови тощо. Для таких випадків ефективне моделювання передбачає:

1. Постійне оновлення карти на підставі даних сенсорів.
2. Використання SLAM для одночасної локалізації апарата та корекції карти середовища.

3. Інтеграцію з метеорологічними платформами для врахування погодних факторів (вітер, опади, туман).

Взаємодія з алгоритмами траєкторій. Створене цифрове середовище стає основою для роботи алгоритмів маршрутизації. Технології на кшталт A*, RRT (Rapidly-exploring Random Tree), D* Lite або генетичні алгоритми використовують ці моделі як графи або сітки з вагами, що відображають ризики, витрати чи відстань у межах певної області.

Якісно виконане моделювання середовища дозволяє:

1. Запобігати зіткненням із перешкодами.
2. Брати до уваги заборонені для польотів зони (no-fly zones).
3. Обирати оптимальні з погляду споживання енергії маршрути.
4. Оперативно адаптуватися до змін у режимі реального часу.

Врахування обмежень. Планування траєкторій дронів у реальних умовах є складним процесом, що потребує врахування численних факторів для забезпечення безпечного, законного, енергоефективного та технічно здійсненного польоту. Недотримання хоча б одного з цих аспектів може спричинити системні збої, аварії або порушення норм регулювання повітряного простору.

1. Фізичні обмеження дрона

Ці обмеження визначаються технічними характеристиками конкретної моделі:

- Максимальна дальність польоту залежить від ємності акумулятора або запасу пального.
- Максимальна швидкість впливає на швидкість доставки до пункту призначення.
- Висота польоту регулюється конструктивними особливостями та класом апарату.
- Маневреність охоплює мінімальний радіус повороту, здатність змінювати висоту та інші параметри.

Усі ці фактори особливо важливі при прокладанні маршрутів у складних умовах, наприклад, у середовищах із перешкодами або густою міською забудовою.

2. Обмеження повітряного простору

Такі обмеження впливають на доступність певних маршрутів:

- Зони обмеженого чи забороненого доступу: військові бази, аеропорти, критична інфраструктура.
- Вертикальні обмеження — висота польоту встановлюється відповідно до законів та регуляторних норм.
- Правила видимості (VLOS/BVLOS) передбачають польоти в зоні прямої видимості чи поза нею за наявності відповідних дозволів.
- Метеорологічні умови, як-от сильний вітер, дощ або туман, можуть створювати тимчасові обмеження.

Ці параметри зазвичай реалізуються шляхом формування на карті зон із обмеженим або утрудненим доступом.

3. Енергетичні обмеження

Ефективне використання енергоресурсів є ключем до успішної роботи дрона, особливо на великих маршрутах. При плануванні потрібно враховувати:

- Енерговитрати під час набору висоти чи спуску.
- Додаткові витрати через вплив вітру.
- Наявність станцій автоматичної зарядки або заміни акумуляторів для далеких перельотів.

4. Точність навігації

У складних середовищах, як міські зони чи густі ліси, можливі втрати або викривлення GPS-сигналу, що створює проблеми для навігації. У таких випадках варто враховувати:

- Ділянки зі слабким прийомом сигналу.
- Застосування альтернативних технологій навігації: інерційних систем чи візуальної локалізації.
- Ризики втрати зв’язку з командним центром.

5. Обмеження вантажу

Параметри вантажу також впливають на характеристики польоту:

- Вага повинна відповідати максимально допустимому для конкретного дрона навантаженню.
- Чутливість до ударів чи нахилів може змінювати місію або темп руху.
- Спеціальні умови транспортування, наприклад температурний режим чи герметичність, стають критичними під час перевезення медикаментів або харчових продуктів.

Врахування всіх описаних факторів дозволяє забезпечити ефективну і безпечну побудову траєкторій для дронів у реальних умовах.

Вибір алгоритму маршрутизації. Процес вибору алгоритму маршрутизації відіграє ключову роль у проєктуванні систем управління дронами, адже саме від нього залежить ефективність, швидкість і надійність побудови маршрутів у заданому середовищі. У випадку безпілотних літальних апаратів (БПЛА), особливо у логістичних завданнях, алгоритми повинні відповідати вимогам щодо обробки складних просторових карт, роботи з динамічними перешкодами, врахування енергетичних обмежень та забезпечення масштабованості.

Алгоритми маршрутизації умовно поділяються на кілька категорій:

1. Детерміністичні алгоритми

Ці алгоритми працюють із заздалегідь відомою картою середовища і дають фіксований результат.

Основні представники:

- Алгоритм Дейкстри — знаходить найкоротший шлях у графі, де всі ребра мають не негативну вагу. Підходить для статичних середовищ, але обчислювально складний для великих графів.
- A* — модифікація алгоритму Дейкстри з використанням евристичної функції. Широко застосовується завдяки високій ефективності, особливо при правильному виборі евристики.
- Алгоритм Жадібного найкращого пошуку (Greedy Best-First Search) — фокусується на наближенні до цілі, жертвуючи глобальною оптимальністю.

2. Стохастичні та еволюційні методи

Їх використовують у складних або динамічних середовищах:

- Генетичні алгоритми (GA) — імітують процес природного добору для пошуку глобального оптимуму, зручні для задач із багатьма обмеженнями.
- Метод рою частинок (PSO) — інспірований поведінкою колективів у природі, дозволяє ефективно обшукувати великий простір рішень.
- Симульоване відпалу (Simulated Annealing) — ефективний при наявності численних локальних мінімумів.

3. Алгоритми на основі машинного навчання

Сучасний розвиток глибинного навчання дозволяє адаптувати нейромережі для планування маршрутів:

- Reinforcement Learning (RL) — агент навчається шляхом взаємодії з середовищем. RL підходить для адаптації до динамічних умов, але вимагає великих обсягів даних і часу на навчання.
- Graph Neural Networks (GNN) — дозволяють навчатися правилам маршрутизації на основі структур графів, у тому числі з урахуванням топології карти.

Основні фактори, які впливають на вибір алгоритму:

- Тип середовища (чи воно є статичним, чи динамічним; відкритим чи обмеженим).
- Часові обмеження (обчислювальна ефективність важлива для систем реального часу).
- Точність і надійність (допустимий рівень відхилення від оптимального маршруту).
- Обчислювальні ресурси (яка складність моделі є прийнятною для реалізації на борту дрона).
- Масштабованість (чи здатний алгоритм ефективно працювати із багатьма дронами одночасно).

Алгоритми маршрутизації мають коректно працювати разом із такими компонентами:

- Системи уникнення перешкод;

- Плани щодо оптимального використання батарей;
- Комунікаційні протоколи між дронами;
- Геоінформаційні системи (GIS).

Таким чином, вибір відповідного алгоритму маршрутизації є вирішальним етапом для забезпечення ефективності та функціональності автономних систем дронів.

3.2 Логістичні аспекти використання БПЛА для доставки

Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сфері логістики поступово змінює традиційні підходи до організації доставки, особливо у контексті забезпечення останньої милі, а також обслуговування віддалених чи важкодоступних територій. У даному розділі здійснюється аналіз основних логістичних елементів, які сприяють ефективній інтеграції дронів у транспортно-логістичні системи, а також окреслюються основні перепони, які необхідно долати для успішного впровадження цих технологій у структурні бізнес-процеси.

Логістичне планування за участю безпілотних літальних апаратів (БПЛА) суттєво відрізняється від традиційних автомобільних чи залізничних рішень. Основними факторами, які впливають на побудову маршрутів, є не тільки географічна відстань, але і забезпечення безпечних умов зльоту та посадки, врахування зон із обмеженнями для польотів, погодних факторів, рівня заряду акумуляторів, а також розмірів і ваги вантажів.

Маршрутне планування часто передбачає координацію між кількома апаратами у флоті, оптимальний розподіл навантаження, правильне визначення точок доставки та пріоритизацію замовлень. Застосування БПЛА потребує точного узгодження між системами обробки замовлень, складськими операціями і польотної логістики, що досягається завдяки інтегрованим інформаційним платформам.

Інфраструктурні вимоги. Для забезпечення ефективної логістики з використанням дронів необхідно створити відповідну інфраструктуру. Вона включає автоматизовані пункти завантаження, станції підзарядки чи заміни батарей, посадкові платформи, оснащені навігаційними маяками, а також хаби або мікросклади для короткострокового зберігання товарів.

Важливу роль відіграє скоординована взаємодія між різними елементами логістичного ланцюга. У межах міських територій можуть застосовуватися «розумні» поштові скриньки, здатні автоматично приймати вантажі, доставлені дронами. У сільській місцевості доцільним є використання мобільних станцій для прийому та технічного обслуговування таких апаратів.

Координація флоту дронів передбачає управління групою апаратів у режимі реального часу, яке може бути організовано централізовано або децентралізовано. Даний процес охоплює розподіл маршрутів польоту, контроль технічного стану систем, аналіз польотних параметрів, виявлення можливих відхилень і своєчасну реакцію на нестандартні ситуації.

Сучасні системи управління флотами реалізуються за допомогою хмарних платформ, які інтегруються з корпоративними ERP/CRM-системами. Використання технологій штучного інтелекту в таких системах сприяє прогнозуванню затримок, раціоналізації ресурсного навантаження, вибору оптимальних траєкторій руху та запобіганню потенційним конфліктам на маршрутах.

Правове регулювання використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сфері логістики залишається одним із ключових факторів, що обмежують їх широке впровадження. У багатьох країнах діють жорсткі нормативи, які стосуються висоти польотів, збереження зони видимості, ваги перевезень, дозволених територій для експлуатації та сертифікації операторів.

Для успішної інтеграції дронів у логістичні процеси компаніям необхідно дотримуватись вимог національного авіаційного законодавства, отримувати відповідну документацію для виконання польотів та забезпечувати захист персональних даних клієнтів у рамках обробки інформації про доставку. Окрім

того, необхідно враховувати міжнародні стандарти з питань авіаційної безпеки та узгодженої взаємодії БПЛА з іншими повітряними засобами.

Економічна ефективність. Використання безпілотних літальних апаратів може значно скоротити витрати на операції порівняно з традиційними методами доставки, особливо у віддалених регіонах із недостатньою інфраструктурою. Однак, для досягнення рентабельності необхідно забезпечити значні обсяги доставок, звести до мінімуму простої техніки та скоротити витрати на її обслуговування.

Аналіз економічної ефективності включає такі аспекти, як амортизація дронів, витрати на електроенергію, страхові внески, навчання персоналу й утримання програмного забезпечення. Розрахунки мають бути цілісними та базуватися на фактичних даних про виконані польоти, кількість клієнтів і вартість альтернативних методів доставки.

3.3 Оптимізація траєкторій польоту безпілотних літальних апаратів

Одним із фундаментальних завдань у сфері застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для логістичних операцій виступає розв'язання проблеми оптимізації траєкторії польоту. Цей процес передбачає визначення такої траєкторії, яка мінімізує витрати енергії, час виконання завдання або ризики, забезпечуючи при цьому виконання всіх технічних, просторових і регуляторних вимог. На відміну від традиційних методів маршрутизації, які орієнтовані здебільшого на вибір дискретного маршруту між визначеними точками, оптимізація траєкторії розглядає рух безпілотника в умовах неперервного простору та часу, враховуючи його динамічні характеристики.

Оптимізація траєкторії польоту безпілотного літального апарата (БПЛА) вимагає врахування комплексного набору критеріїв, які безпосередньо впливають на ефективність, безпеку та економічну обґрунтованість виконання польотної місії. Залежно від специфіки поставленого логістичного завдання, вагомість цих

критеріїв може варіюватися, що відображається в побудові загальної цільової функції.

Одним із ключових аспектів оптимізації є мінімізація енергоспоживання, що має першочергове значення для безпілотників, які функціонують на основі електричних акумуляторів. У такому випадку пріоритет віддається траєкторіям з домінантним горизонтальним польотом, мінімальними вертикальними маневрами та уникненням значних вітрових перешкод.

Для деяких логістичних сценаріїв, зокрема у медичній доставці або у виконанні надтермінових завдань, основним критерієм стає скорочення часу польоту. Однак оптимальний за швидкістю маршрут не завжди задовольняє вимоги безпеки чи енергозбереження, що необхідно враховувати у процесі планування.

Максимізація безпеки траєкторії спрямована на уникнення польотів через зони з високою турбулентністю, густою забудовою, зонами електромагнітних перешкод або ділянками з підвищеним ризиком зіткнень. Такий підхід є критично важливим для захисту як самого апарата, так і вантажу.

Додатково враховується параметр плавності траєкторії, що спрямований на зниження динамічних навантажень на конструкцію БПЛА. Це має особливе значення у випадках транспортування крихких або чутливих вантажів, де навіть незначні коливання можуть негативно вплинути на їх цілісність.

Суттєвим фактором є також дотримання просторових обмежень і регламентів повітряного простору. Це забезпечує відповідність діючому авіаційному законодавству та дозволяє уникати перетину заборонених зон, таких як регіони No-fly zones, території аеропортів або об'єкти критичної інфраструктури.

Загалом, процес оптимізації будується як багатокритеріальна модель, в якій кожен з параметрів може набувати визначених пріоритетів чи вагових коефіцієнтів залежно від специфічних умов та вимог до польоту. Такий підхід дозволяє формувати максимально збалансовані рішення для реалізації різноманітних логістичних завдань.

Методи оптимізації

1.Класичні чисельні методи

Методологія динамічного програмування є ефективним інструментом для оптимізації маршрутів, оскільки передбачає розбиття складної задачі на більш прості підзадачі. Основною перевагою цього методу є висока точність отриманих результатів, хоча його обмеження полягають у значному зростанні обчислювальної складності при збільшенні кількості змінних, що часто проявляється як експоненційний темп зростання витрат ресурсів.

Градієнтні методи, серед яких класичним прикладом є метод найшвидшого спуску, ґрунтуються на аналізі похідних функції витрат. Ці алгоритми демонструють високу швидкість обчислень, але їхня ефективність істотно знижується в умовах багатовимірних просторів із численними локальними мінімумами, що може призводити до нестабільності в результатах.

Методи варіаційного числення пропонують рішення задачі оптимізації шляхом визначення функції траєкторії, яка забезпечує екстремум заданого функціоналу (мінімум або максимум). Ці алгоритми є перспективними для теоретичних та ідеалізованих моделей, однак їхня практична реалізація часто супроводжується серйозними технічними та обчислювальними викликами.

2. Стохастичні та еволюційні алгоритми

Генетичні алгоритми (GA), натхненні принципами еволюційної біології, здійснюють пошук оптимального рішення через моделювання процесів природного відбору, схрещування та мутації в популяції рішень. Це робить їх особливо ефективними для розв’язання задач, де точний математичний опис є недосяжним чи надто складним.

Метод рою частинок (PSO) пропонує вирішення проблем оптимізації за допомогою колективної поведінки агентів, котрі рухаються у просторі рішень, орієнтуючись на свій індивідуальний досвід і глобальні досягнення. Він характеризується легкістю реалізації та високою здатністю до масштабування.

Симульоване відпалу (SA) базується на концепції поступового зменшення температури системи, що дозволяє здійснювати пошук глобального мінімуму

через подолання пасток локальних мінімумів. Незважаючи на цю перевагу, одним із його суттєвих недоліків є тривалий час досягнення збіжності до оптимального рішення.

3. Методи штучного інтелекту

Метод навчання підкріпленням (Reinforcement Learning, RL) зосереджений на моделюванні адаптивної поведінки агента у взаємодії із симульованим або реальним середовищем. Основна стратегія полягає в отриманні максимальної винагороди за рахунок удосконалення своїх дій. Цей метод демонструє значну гнучкість і здатність до адаптації, проте його впровадження потребує великих обсягів даних і значних обчислювальних ресурсів.

Імітаційне навчання (Imitation Learning, IL) орієнтоване на навчання через спостереження за діями експерта. Такий підхід ефективний у ситуаціях, коли вже існує якісна база даних із вдалих прикладів або демонстрацій.

Здійснення адаптивної оптимізації значною мірою залежить від інтеграції сенсорної зворотної інформації. Дані з таких джерел, як камери, лідари та інерційні вимірювальні одиниці (IMU), дозволяють ідентифікувати наявність перешкод у реальному часі та забезпечують точне визначення просторового положення об'єкта.

Критично важливим аспектом є також урахування залишкових енергетичних ресурсів апарата. За недостатності заряду для завершення початково запланованого маршруту оптимізація передбачає корекції, що дають змогу раціонально перерозподілити маршрутну мережу, адаптуючи її до наявних енергетичних обмежень.

Реалізація цієї адаптивної стратегії стає можливою завдяки впровадженню високопродуктивних бортових обчислювальних систем та використанню хмарних платформ, здатних обробляти інформацію в режимі реального часу.

Моделювання аеродинаміки та енерговитрат. Коректне моделювання фізичних характеристик апарату є ключовим для забезпечення більш точного оцінювання енергоспоживання на різних етапах маршруту. Визначальними параметрами при цьому виступають:

Аеродинамічний опір, що залежить від швидкості руху, площі проекції фюзеляжу та кута атаки;

Підіймальна сила, яка варіюється залежно від швидкості, аеродинамічного профілю крила та просторового положення апарату;

Зміна маси системи, що може відбуватися, наприклад, унаслідок скидання вантажу;

Зовнішні впливи, такі як сила і напрямок вітру, температурні градієнти та зміни атмосферного тиску.

Енергетична модель також враховує тип силової установки (електрична або гібридна), ефективність роботи пропелера, внутрішні втрати енергії в акумуляторних батареях та коефіцієнт перетворення енергії. Усі ці параметри інтегруються для побудови більш точної цільової функції в процесі оптимізації.

Підхід багатокритеріальної оптимізації. Під час вирішення реальних завдань оптимізація часто вимагає врахування кількох критеріїв одночасно, що унеможливлює її зведення до одного показника. У таких випадках застосовується багатокритеріальний підхід, який дає змогу оцінювати та обирати компромісні рішення.

Методи Pareto-оптимальності формують множину рішень, які є Pareto-ефективними. Ці рішення не можуть бути покращені за одним критерієм без погіршення іншого, а вибір конкретного варіанту здійснюється відповідно до заданих пріоритетів замовника або властивостей системи.

Метод зважених сум критеріїв передбачає нормалізацію кожного критерію та помноження його на відповідний ваговий коефіцієнт. Такий підхід дозволяє об’єднати кілька критеріїв в єдину цільову функцію, яка підлягає оптимізації.
Методи ранжування базуються на оцінці рішень за окремими критеріями з подальшим їх комбінуванням через суму рангів або шляхом використання відносних оцінок.

У сфері автономної логістики багатокритеріальна оптимізація забезпечує високу гнучкість і адаптивність у змінних умовах, зокрема в надзвичайних

ситуаціях. Наприклад, у кризових обставинах може виникнути необхідність пріоритизувати швидкість виконання завдань над економічністю процесів.

3.4 Координація кількох дронів

У реальних практичних задачах оптимізація часто не може бути обмежена лише одним критерієм оцінки. Ситуації такого типу вимагають застосування багатокритеріального підходу, який дає змогу здійснювати аналіз і вибір компромісних рішень, що враховують декілька вагомих аспектів одночасно.

Із розвитком безпілотних авіаційних систем стрімко зростає актуальність координації груп безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які виконують завдання в межах спільного повітряного простору. У таких сферах як масштабна логістика, моніторинг або обслуговування великих територій, узгоджена робота кількох дронів надає можливість суттєво підвищити загальну ефективність діяльності, скоротити час необхідної для виконання завдань та забезпечити рівномірний розподіл навантаження між апаратами. Водночас, використання таких мультиагентних систем породжує низку серйозних викликів, серед яких уникнення конфліктів маршрутів, забезпечення стабільного зв'язку між дронами та синхронізація їх дій у реальному часі.

Підходи до координації. Існує кілька підходів до організації координації флоту безпілотних літальних апаратів, які розрізняються за структурою управлінської архітектури, обсягом і характером обміну інформацією, а також за рівнем автономності дронів.

1. Центральна модель управління

Дана схема передбачає підключення всіх дронів до єдиної координувальної платформи, якою може бути наземна станція управління або хмарний сервер. Основними функціями центру є розподіл завдань, планування маршрутів і вирішення можливих конфліктів у процесі роботи.

Основні переваги:

- Повний контроль над функціонуванням системи в цілому.
- Здатність здійснювати оптимізацію на рівні всього флоту.
- Централізоване відстеження ресурсів дронів (стан заряду батареї, навантаження, технічні параметри).

Ключові недоліки:

- Вразливість до збоїв зв’язку між дронами і центром управління.
- Обмеження масштабованості системи у разі збільшення кількості апаратів.
- Затримки у прийнятті рішень при зростанні навантаження на систему.

2. Децентралізована модель управління

У межах цього підходу кожен безпілотник приймає рішення автономно, використовуючи локальні дані та здійснюючи обмежений обмін інформацією з іншими пристроями за принципом peer-to-peer.

Основні переваги:

- Висока адаптивність до змін у середовищі виконання завдань.
- Надійна масштабованість системи за рахунок відсутності залежності від центрального керуючого вузла.
- Підвищена стійкість до критичних збоїв в окремих елементах системи.

Ключові недоліки:

- Імовірність виникнення конфліктів через брак глобального контролю (наприклад, перетин маршрутів).
- Складність забезпечення загальної оптимізації діяльності флоту.

3. Роїнтелект (Swarm Intelligence)

Цей підхід натхнений поведінково-когнітивними моделями природних систем, таких як колективна поведінка птахів або комах. Функціонування флоту ґрунтується на базових правилах локальної взаємодії між дронами: підтримання оптимальної дистанції, визначення напряму руху і гармонізація спільних дій.

Основні переваги:

- Абсолютна децентралізація системи управління.
- Незначні обчислювальні вимоги до апаратного забезпечення.

- Ефективна синхронізація маршрутів великої кількості дронів.

Ключові недоліки:

- Складність проведення формального аналізу стабільності всієї системи.
- Висока чутливість до помилок у локальних даних, що можуть вплинути на загальну ефективність роботи флоту.

Таким чином, кожен підхід має свої сильні та слабкі сторони, і вибір оптимальної моделі управління залежить від конкретних завдань, умов експлуатації та технічних можливостей апаратів.

Комунікаційні аспекти. Для забезпечення ефективної роботи дронів необхідна стабільна та надійно захищена система зв'язку. Залежно від специфіки операції, використовуються такі технології:

1. Радіоканали (частоти 433/915 МГц, Wi-Fi, LTE/5G).
2. Міждронова телеметрія на основі Mesh-мереж, що дозволяє створювати адаптивну та гнучку взаємодію між пристроями.
3. Технології позиціонування через GPS або локалізовані RTK-системи.

При виконанні масштабних місій надзвичайно важливо гарантувати високу якість обслуговування (QoS) для критичних алгоритмів, таких як уникнення зіткнень або швидке реагування на команди екстреної зупинки.

Методи, які дозволяють уникнути конфліктів і зіткнень:

1. Передбачуване уникнення. Маршрути прокладаються з урахуванням передбачуваного руху інших апаратів, що базується на принципі прогнозування конфлікту часових вікон (Time-Window Conflict Avoidance).

2. Реактивне уникнення. За допомогою сенсорних систем, таких як лідари, ультразвукові датчики чи камери, дрон здатен оперативно змінювати свій маршрут при виявленні іншого апарата в потенційно небезпечній близькості.

3. Вертикальне розділення. Для мінімізації ризику зіткнень дрони розподіляються по різних ешелонах висоти.

4. Використання віртуальних коридорів (geofencing). Це дозволяє створювати чітко визначені та обмежені зони польоту для кожного окремого апарата.

Приклади практичного застосування координації дронів. Застосування координаційних систем у роботі дронів вже широко реалізоване на практиці, що підтверджується численними успішними прикладами. Ці системи довели свою ефективність у спільній роботі безпілотників для вирішення складних завдань у сферах логістики, моніторингу та гуманітарної допомоги. Варто детальніше ознайомитися з кількома знаковими проєктами, які яскраво демонструють принципи та переваги координаційних підходів у реальних умовах.

1. Amazon Prime Air

Amazon Prime Air є новаторським проектом корпорації Amazon, спрямованим на забезпечення доставки невеликих товарів за допомогою дронів упродовж кількох хвилин. Основна характеристика цього рішення полягає в глибокій інтеграції флоту дронів із централізованою логістичною платформою компанії.

Ключові аспекти координації:

- Використання централізованої системи управління, яка відповідає за планування польотних завдань, синхронізацію маршрутів і уникнення конфліктів.
- Автоматичне призначення дронів відповідно до параметрів замовлення, включаючи геолокацію клієнта, масу вантажу та рівень заряду батареї.
- Організація посадкових операцій біля клієнтів шляхом використання спеціальних міток або маркерів на території доставлення.
- Оснащення дронів сучасними сенсорами для уникнення перешкод у вигляді людей, тварин чи будівель.

Ця система є прикладом високорівневого централізованого управління з активним використанням алгоритмів штучного інтелекту для прийняття рішень на основі хмарних обчислень.

2. Zipline

Zipline є унікальним прикладом впровадження дронів для медичної доставки у віддалених регіонах, таких як Руанда, Гана та окремі території США. Основна мета діяльності компанії полягає у швидкому постачанні медичних

матеріалів, включаючи кров, вакцини та медикаменти, у віддалені медичні установи.

Організаційні особливості:

1. Центральне управління флотом дронів через базовий координаційний центр (Fulfillment Center).
2. Застосування технології попереднього планування часових інтервалів для запобігання перетину маршрутів дронів.
3. Впровадження системи доставки на основі «one-way delivery», коли вантаж скидається за допомогою парашута без необхідності посадки.
4. Автоматичний зворотний політ дрона разом із реєстрацією та аналізом польотної історії.

Модель Zipline поєднує централізоване управління з можливостями автономного польоту дронів, особливо на фінальних етапах доставки та навігації.

2. DJI Terra та Swarm SDK

DJI Terra являє собою професійну програмну платформу для вирішення задач картографування і аерофотозйомки. У рамках цієї системи можливе одночасне залучення декількох дронів завдяки інтеграції з Swarm SDK.

Технічні характеристики:

1. Одночасна реалізація кількома дронами завдань у межах одного проекту (до 10–20 одиниць).
2. Застосування шаблонів покриття території, таких як грід-зондування або кругові траєкторії польотів.
3. Передача телеметричних даних у реальному часі для створення 3D-реконструкцій місцевості.
4. Координація дронів із функціями міждронового уникнення зіткнень завдяки сенсорним даним.

Ця платформа демонструє модель децентралізованої координації: дрони обмінюються даними локально й адаптують свої маршрути в режимі реального часу.

4. Wing (дочірнє підприємство Alphabet)

Wing успішно реалізувала масштабну систему доставки дронами в Австралії, США та Фінляндії. Сервіс спрямований на доставку різноманітних товарів, таких як гарячі напої, медикаменти або продукти харчування, від локальних партнерських компаній до кінцевих споживачів.

Особливості координації:

1. Використання автономних дронів із централізованою системою маршрутизації.
2. Запровадження віртуальних повітряних коридорів для оптимізації потоків

ВИСНОВОК

У цій дипломній роботі проведено ґрунтовне і всебічне дослідження проблематики, пов’язаної з маршрутизацією та оптимізацією траєкторій безпілотних літальних апаратів (БПЛА), розроблених для здійснення доставки вантажів на значні відстані. Дослідження охоплює як теоретичну основу маршрутного планування та управління логістичними процесами флоту дронів, так і практичні аспекти, що стосуються конструктивних рішень, вибору навігаційних систем, забезпечення енергетичної ефективності та організації управлінських процесів.

У ході роботи було виконано такі завдання:

- здійснено аналіз сучасних конструктивних і енергетичних рішень, спрямованих на створення дронів з можливістю тривалих автономних польотів;
- розроблено модель дрона для доставки з урахуванням конструктивних особливостей;
- досліджено логістичні аспекти впровадження БПЛА в систему вантажної доставки, включаючи аналіз інфраструктурних, нормативно-правових та економічних чинників;
- виконано огляд і порівняльний аналіз алгоритмів для розв’язання задач маршрутизації та оптимізації траєкторій, включаючи евристичні, стохастичні й методи машинного навчання;
- вивчено підходи до координації групових дій дронів під час одночасного виконання логістичних завдань у спільному повітряному просторі;
- розроблено структурно-функціональну модель БПЛА літакового типу з гібридною силовою установкою та визначено її ключові складові елементи.

Результати дослідження підтверджують доцільність використання безпілотних літальних апаратів для автономної доставки вантажів, зокрема в умовах, де традиційні логістичні підходи є недостатньо ефективними або практично нездійсненними. Оптимізація маршрутів та траєкторій дозволяє значно

зменшити витрати енергії, скоротити час виконання логістичних завдань, а також підвищити рівень безпеки польотів.

Отримані висновки можуть бути використані як основа для подальших досліджень у галузі автономної логістики, розробки адаптивних систем управління флотом БПЛА, а також створення прототипів із практичним застосуванням у промисловості, сільському господарстві, медицині та рятувальних операціях в умовах надзвичайних ситуацій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Anderson, J. D. Jr. Fundamentals of Aerodynamics, 5th ed., McGraw-Hill, 2010. https://archive.org/details/FundamentalsOfAerodynamics5thEdition
2. National Advisory Committee for Aeronautics. The Characteristics of 78 Related Airfoil Sections from Tests in the Variable-Density Wind Tunnel, NACA Report No. 460, 1933. www.pdas.com/refs/rep460.pdf
3. Jacobs, E. N., Ward, K. E. & Pinkerton, R. M. The Characteristics of 78 Related Airfoil Sections…, NACA Report No. 460 supplement, 1935. https://ntrs.nasa.gov/citations/19930091108
4. Abbott, I. H. & von Doenhoff, A. E. Theory of Wing Sections, Dover Publications, 1959. https://aeroknowledge77.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/09/58986488-theory-of-wing-sections-including-a-summary-of-airfoil-data.pdf
5. Jiao, K. & Luo, Y. “A comprehensive review of fuel cell and hybrid power systems for UAV endurance extension,” Journal of Power Sources 536, (2022). https://www.researchgate.net/publication/362495475_A_Comprehensive_Review_on_Fuel_Cell_UAV_Key_Technologies_Propulsion_System_Management_Strategy_and_Design_Procedure
6. Lee, D. & Kim, S. “Review on hybrid-electric propulsion systems for high-altitude long-endurance UAVs,” Renewable Energy 203, (2023). https://www.researchgate.net/publication/341798011_Review_on_the_Hybrid-Electric_Propulsion_System_and_Renewables_and_Energy_Storage_for_Unmanned_Aerial_Vehicles
7. Smith, A. et al. “Drones in last-mile delivery: Efficiency and sustainability review,” Transportation Research Part D 99, (2023). https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19760003945/downloads/19760003945.pdf
8. Silva, P. & Costa, R. “Energy management technologies in hybrid-electric UAVs,” Applied Energy 330,

(2024). https://www.researchgate.net/publication/330153636_Hybrid_energy_systems_in_unmanned_aerial_vehicles

9. Elhenawy, M. et al. “A survey on drone routing algorithms for delivery systems,” Sensors 23, (2023). https://www.pdas.com/refs/rep460.pdf
10. Zhu, X. & Cao, Y. “UAV path planning techniques: A survey,” RAIRO-Operations Research 58, 1–34 (2024). https://www.researchgate.net/publication/379299233_UAV_Path_Planning_Techniques_A_Survey
11. Yong He, Ticheng Hou, Mingran Wang “ A new method for unmanned aerial vehicle path planning in complex environments,” (2024). https://www.researchgate.net/publication/380002995_A_new_method_for_unmanned_aerial_vehicle_path_planning_in_complex_environments
12. Wang, H. et al. “Optimization of tandem truck-drone delivery networks with trajectory design,” Computers & Industrial Engineering 185, (2024). https://www.researchgate.net/publication/363100237_Optimization_of_Trucks_and_Drones_in_Tandem_Delivery_Network_with_Drone_Trajectory_Planning
13. Wang, Y. et al. “UAV navigation using visual SLAM in dynamic environments” https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930090976/downloads/19930090976.pdf
14. Drones in last-mile delivery: a systematic literature review from a logistics management perspective https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1838692/FULLTEXT01.pdf
15. Julián Tomaštík , Martin Mokros, Peter Surovy, Alžbeta Grznárová UAV RTK/PPK Method - An Optimal Solution for Mapping Inaccessible Forested Areas? (2023). https://www.researchgate.net/publication/331987882_UAV_RTKPPK_Method_-_An_Optimal_Solution_for_Mapping_Inaccessible_Forested_Areas
16. Austin, R. Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment. John Wiley & Sons,

2010. https://www.academia.edu/35313270/Reg_Austin_Unmanned_Air_Systems_UAV_Design_Development_and_Deployment

17. Drone Materials & Design. Fly Eye https://www.flyeye.io/drone-technology-materials-design/
18. FAA. “Unmanned Aircraft Systems (UAS) https://www.faa.gov/uas
19. Zhang, L. & Fu, X. “Optimal path planning for UAVs using genetic algorithms,” Journal of Intelligent Systems 29, (2014). https://ntrs.nasa.gov/citations/19930090937
20. Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles https://www.mdpi.com/2504-446X/3/1/4

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

Маршрутизація дронів для доставки вантажів на далекі відстані з оптимізацією їх траєкторій

Виконав студент 4 курсу
Групи ІСД-43
Ахмедов Тагір Мамедович
Керівник:
Шахматов Іван Олександрович

Київ – 2025

МЕТА ТА ЗАДАЧІ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Мета дипломної роботи є підвищення ефективності маршрутизації безпілотних літальних апаратів для доставки вантажів на далекі відстані шляхом використання гібридної енергосистеми та алгоритмів штучного інтелекту в умовах обмежених енергетичних ресурсів.

Задачі. Проаналізувати сучасні типи безпілотних літальних апаратів. Розробити конструктивну модель дрона. Розрахувати основні аеродинамічні та енергетичні параметри. Оптимізувати траєкторії польоту дронів.

2

Види дронів та їх особливості

- **Мультикоптери**

- **Дрони літакового типу**

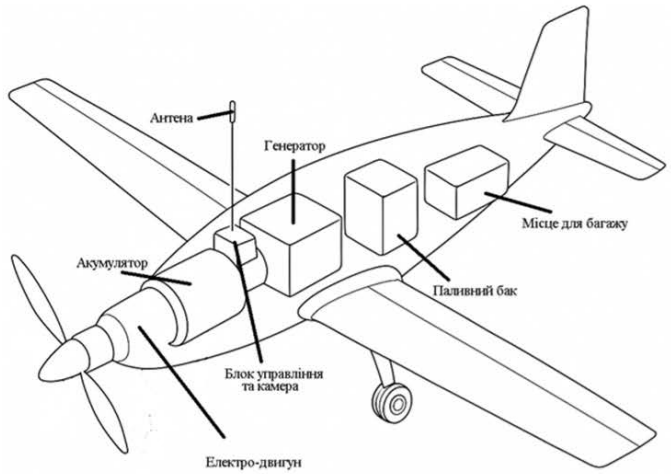
- **Гібридні апарати**

- **Переваги та недоліки кожного типу**

3

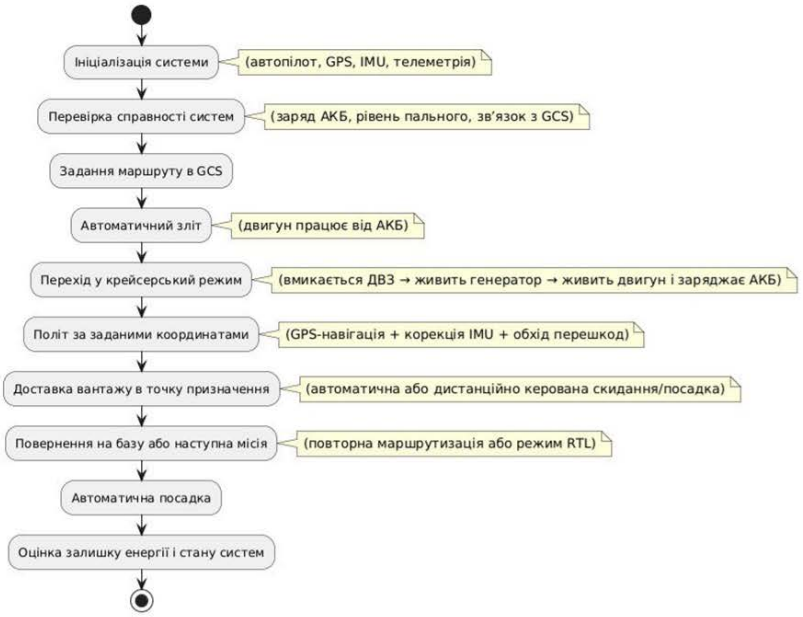
Конструкція дрона

- Літаковий тип із фіксованим крилом
- Гібридна силова установка (ДВЗ + генератор + акумулятор)
- Компонування: фюзеляж, оперення, шасі, розташування силової установки



4

Алгоритм роботи дрона-доставника



5

Енергосистема дрона

Компонент	Характеристики
Акумулятор	Ємність ≈ 3 кВт·год Маса ≈ 15 кг
ДВЗ	Потужність достатня для 5–6 кВт генерації
Генератор	Потужність: 5–6 кВт
Паливо (бензин)	≈ 7–8 кг (≈ 10 літрів)
Електродвигун (BLDC)	Номінальна потужність ≈ 7.0 кВт
Сумарна енергія системи	≈ 25 кВт·год

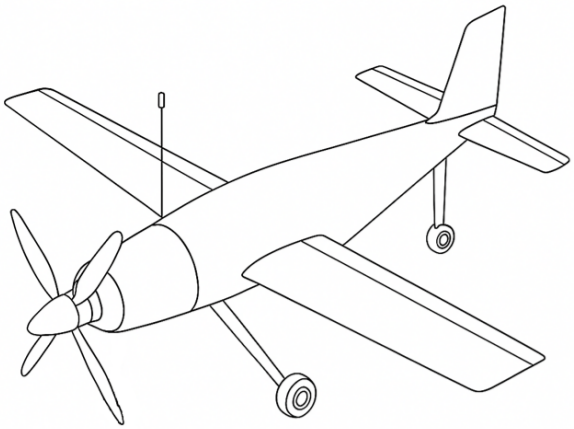
6

Характеристики дрона

Геометричні характеристики:
Розмах крила ≈ 3.0 м
Площа крила ≈ 1.2 м²
Довжина фюзеляжу ≈ 2.5 м
Висота апарата (включно з шасі) ≈ 1.0 м
Злітна маса ≈ 70 кг

Маса та навантаження:
Маса корисного вантажу до 20 кг
Маса пального ≈ 7–8 кг

Льотні характеристики:
Крейсерська швидкість ≈ 90 км/год (25 м/с)
Дальність польоту до 400 км
Тривалість польоту ≈ 4.4 год



7

Авіоніка та системи керування

- Автопілот: Pixhawk / Cube Orange
- Програмне забезпечення: QGroundControl або Mission Planner
- Телеметрія, камера, FPV

8

Порівняння з аналогами

Модель дрона	Тип	Вантажопідйомність	Дальність польоту	Енергосистема	Орієнтовна ціна (USD)
Дипломний дрон	Фіксоване крило	20 кг	~400 км	Гібридна	~$10,000
Wingcopter 198	Фіксоване крило + вертикальний зліт	до 4.7 кг	до 94 км	Електро	~$50,000–100,000
Zipline P2	Фіксоване крило	до 3.6 кг	до 160 км	Електро	~$10,000–15,000
Sword Cargo 4.0	Фіксоване крило	20–50 кг	до 500 км	Гібридна	~$80,000–100,000
Gadfin Spirit-X	Фіксоване крило + eVTOL	до 100 кг	до 500 км	Гібридна	~$80,000–150,000.
Penguin B	Фіксоване крило	до 10 кг	до 1000 км	Електро	<$20,000
Aeromapper Talon	Фіксоване крило	до 0.6 кг	до 120 хв	Електро	~$9,980–16,000

9

Принципи маршрутизації дронів

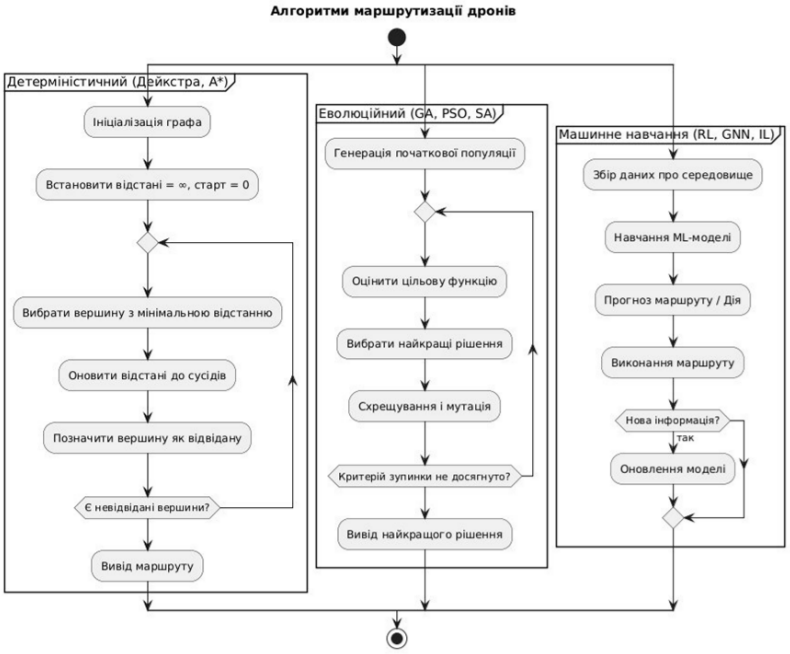
Цілі: мінімізація часу, енергії, ризиків

Врахування: перешкоди, no-fly зони, погода

Алгоритми:

- Детерміністичні алгоритми
- Стохастичні та еволюційні методи
- Алгоритми на основі машинного навчання

10



11

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано сучасні типи дронів, їх конструктивні особливості та сфери застосування — виявлено доцільність використання літакового типу для дальньої доставки вантажів.
2. Прораховано основні аеродинамічні та енергетичні параметри: площу крила, злітну масу, споживання енергії, оптимальну конфігурацію енергосистеми.
3. Визначено, що для досягнення дальності польоту 400 км з вантажем 20 кг найбільш ефективною є гібридна силова установка (ДВЗ + генератор + акумулятор).
4. Розроблено модель дрона з модульною конструкцією та оптимізованими розмірами, що забезпечує стабільний політ і економію енергії.
5. Запропоновано підхід до інтелектуальної маршрутизації дрона із застосуванням детерміністичних, стохастичних та алгоритмів основі машинного навчання.
6. Цим самим покращено ефективність автономної доставки — зменшено енергоспоживання та підвищено точність виконання місії.

12

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ахмедов Т.М., Шахматов І.О. — Інтелектуальна маршрутизація дронів з використанням алгоритмів штучного інтелекту в умовах обмежених ресурсів. Кафедра штучного інтелекту. Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні інтелектуальні інформаційні технології в науці та освіті». 15.05.25, ДУІКТ, м.Київ (подано до друку).

13

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!