

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

«КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки та систем управління

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

_____Тачиніна О.М.

“15” грудня 2025р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(пояснювальна записка)

випускника освітнього ступеня

“МАГІСТР”

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Тема Система керування польотом БПЛА з підвищеною точністю траєкторного
руху

High-Precision Trajectory Flight Control System for UAV

Виконавець: Рижков Олександр Олексійович

Керівник: Кривоносенко Олександр Петрович

Нормоконтролер: Дивнич Микола Полікарпович

Консультант з «Охорони праці» Вальченко Олександр Іванович

Консультант з «Охорони навколишнього середовища» Дмитруха Тетяна Іллівна

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Факультет аеронавігації електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки та систем управління

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Тачиніна О.М.

«15» грудня 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Рижкова Олександра Олексійовича

1. Тема кваліфікаційної роботи Система керування польотом БПЛА з підвищеною точністю траєкторного руху

затверджена наказом ректора від «01»09.2025 р. №1648/ст

2. Термін виконання роботи: з 01.09.2025 по 15,12,25

3. Вихідні дані до роботи: Метою даної роботи є створення системи управління польотом квадрокоптера по траєкторії

4. Зміст пояснювальної записки: БПЛА використовує три системи для керування собою - GPS/Glonass супутники, команди з пульта керування і датчики.

5. Перелік ілюстративного матеріалу презентації:

Малюнки, таблиці та скріншоти

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Пошук матеріалів	01,09,2025 01,10,2025	Виконав
2	Написання роботи	02,10,2025 15,12,2025	Виконав

7. Консультанти з окремих розділів кваліфікаційної роботи

Назва розділу роботи		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Вальченко Олександр Іванович	02.10.2025	02.10.2025
Охорона навколишнього середовища	Дмитруха Тетяна Іллівна	02.10.2025	02.10.2025

8. Дата видачі завдання: "01"09 2025 р.

Керівник кваліфікаційної роботи Кривоносенко Олександр Петрович

(підпис керівника)

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання Рижков Олександр Олексійович

Зміст

Вступ.....	8
1.Математичне моделювання динаміки БПЛА.....	13
1.1Вимоги до надвисокої точності у прикладних місіях БПЛА	17
1.2Високоточна логістика та сільське господа	18
1.3 Автономне картографування та 3D-реконструкція.....	18
2. Методи та алгоритми підвищення точності траєкторного руху.....	20
2.1. Аналіз джерел похибок у траєкторному русі.....	20
3. Розробка та імітаційне моделювання.....	26
3.1. Структурна схема розробленої СКШ.....	29
3.2. Імітаційне моделювання системи	30
4 Сценарії польоту.....	32
5 Розрахункова частина.....	55
5.1Результат розрахункової частини	62
6 Вплив штучного інтелекту на системи керування БПЛА	66
Охорона праці	71
Охорона навколишнього середовища	74
Висновки.....	79
Списки використаних джерел.....	82
Додаток1	84
Додаток2	86

Вступ

Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) використовуються у військовій, цивільній, науковій та інженерній сферах. Одним із ключових завдань системи керування польотом є забезпечення високої точності траєкторії руху навіть за умов дії зовнішніх збурень та похибок сенсорів.

У доповіді розглянуто структуру системи керування, математичні моделі руху, алгоритми стабілізації, методи фільтрації даних, а також наведено розрахункову частину щодо оцінки похибок та оптимізації траєкторії.

Управління БПЛА (Безпілотним Літальним Апаратом) – це процес контролю польоту дрона оператором із землі за допомогою наземної станції управління (пульт, ноутбук) для виконання розвідувальних, ударних, картографувальних чи інших завдань, що включає знання авіаційної метеорології, навігації, вміння працювати в умовах РЕБ (Радіоелектронної Боротьби) та розуміння особливостей самого дрона, і це може здійснюватися через різні канали зв'язку, від радіо до супутникового.

Основні аспекти управління БПЛА

Наземна станція управління (Ground Control Station - GCS): Пристрій, що забезпечує зв'язок з дроном, дозволяючи оператору надсилати команди та отримувати дані з камери, датчиків, аналізувати інформацію в реальному часі.

Способи керування

Через центральний пульт: Найбільш поширений для цивільних дронів, але може мати обмежену дальність.

Окремий радіоканал: Гнучкий, але може мати обмеження дальності, особливо для цивільних систем.

Через фотоелемент: Використовує польотні вогні дрона для активування додаткових функцій, універсальний метод для легких БПЛА.

Автономне управління: З використанням заздалегідь запрограмованих маршрутів та систем навігації.

Техніки керування (залежно від типу дрона):

Мультироторні (квадрокоптери): Зміна тяги гвинтів для контролю підйому, спуску, повороту.

Літакового типу: Використання рулів висоти, напрямку, елеронів, як у літаках, а також зміна тяги двигуна.

Навички оператора:

Знання авіаційної метеорології, навігації.

Розуміння принципів роботи радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Навички пілотування, в тому числі в умовах перешкод та вітру.

Навчання операторів

Існують спеціалізовані центри, що готують операторів БПЛА для різних завдань:

Мультироторні (базові курси): Робота з квадрокоптерами для розвідки.

Літакового типу (крило): Комплексні програми для дронів-літаків.

FPV (First Person View): Польоти від першої особи в умовах РЕБ, зборка та налаштування дронів.

Безпілотно́й літа́льний апарáт (скор. БпЛА або дрон) — літальний апарат, який може злітати, здійснювати політ і сідати без фізичної присутності пілота на його борту.

Політ БпЛА може здійснюватися під дистанційним керуванням людини-оператора, як віддалено пілотований літальний апарат (англ. RPA), або з різним ступенем автономності, як-от допомога автопілоту, аж до повністю самостійного, який не передбачає втручання людини.

Термін «БпЛА»

Визначення українського законодавства

Українське законодавство надає такі визначення безпілотного повітряного судна та безпілотного авіаційного комплексу.

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) — повітряне судно, призначене для виконання польоту без пілота на борту, керування польотом якого і контроль за яким здійснюються відповідною програмою або за допомогою спеціальної станції керування, що знаходиться поза повітряним судном.

Безпілотне повітряне судно — повітряне судно, призначене для виконання польоту без пілота на борту, керування польотом якого і контроль за яким здійснюються за допомогою спеціальної станції керування, що розташована поза повітряним судном.

Докладніше цей термін роз'яснює Міністерство оборони України.

Безпілотне повітряне судно (безпілотний літальний апарат) — повітряне судно, керування польотом якого і контроль за яким здійснюються дистанційно за допомогою пункту дистанційного пілотування, що розташований поза повітряним судном, або повітряне судно, що здійснює політ автономно за відповідною програмою.

Безпілотний авіаційний комплекс (безпілотна авіаційна система) (далі — БПАК) — безпілотне повітряне судно, пов'язані з ним пункти дистанційного пілотування (станції наземного керування), необхідні лінії керування і контролю та інші елементи, вказані в затвердженому проекті типу цього БПАК. БПАК може включати декілька БПЛА.

Розвиток визначення БПЛА

За сучасним (2010-ті роки) визначенням, «безпілотником» є лише той апарат, який перебуває під постійним дистанційним контролем пілота або пілотів і призначений для повернення на аеродром і для подальшого повторного використання. Тобто крилата ракета до категорії «безпілотників» не належить (JDN 2/11 2011, р. 2-1) (англ.).

Раніше радіокеровані та повністю автоматизовані апарати об'єднували визначенням безпілотна авіація — літаки, керування (пілотування) якими

здійснюється без пілота, за допомогою приладів різних систем, які засобами радіо (радіолокації, телебачення) подають команди на автопілот. Елементи системи керування містяться поза літаком і можуть бути на землі, на воді і в повітрі, на місці старту, на маршруті польоту і в районі цілі. Для передавання на пункт управління даних, отриманих з бортових сенсорів, у складі БпЛА є радіопередавач, що забезпечує зв'язок з наземним обладнанням. Залежно від формату зображень та їхнього стискання, регламентованих, наприклад, в STANAG 4609, швидкість передавання цифрових радіоканалів зв'язку з БпЛА може становити одиниці-сотні Мбіт/с. Перед передаванням з борту БпЛА отриманих зображень високої чіткості, їх сегментують.

Класифікація

Класифікація за керованістю

Наземний пункт керування безпілотним літальним апаратом. Екіпаж виконує бойовий (спостережний) політ над територією. Ліворуч — пілот, праворуч — оператор сенсорів

Залежно від способів керування, розрізняють такі різновиди безпілотних літальних систем:

безпілотні некеровані;

безпілотні автоматичні;

безпілотні дистанційно-пілотовані літальні апарати (ДпЛА).

В авіації після 2000 року йде стрімке розширення саме останнього типу апаратів, й про них мова, коли вживають термін «безпілотник», «дрон» (англ. drone), або аббревіатуру UAV. Тобто під терміном «безпілотник», «БпЛА», «UAV» мається на увазі саме повітряне судно, яким через канали зв'язку керує один або декілька пілотів. Екіпаж БпЛА може також включати командира, оператора сенсорів, оператора вогневих засобів. Екіпажі БпЛА під час довготермінових місій змінюються — як на загал, кожні 4 години.

Класифікація військових БпЛА НАТО

Безпілотні (англ. unmanned — без людини на борту) літальні апарати, відповідно до стандартів НАТО, так само, як і літаки із пілотом на борту (англ. manned aircraft), керуючись значенням повної злітної маси розділено на 3 класи:

I — повна злітна маса до 150 кг

II — повна злітна маса до 600 кг

III — повна злітна маса більше 600 кг. (JDN 2/11 2011, р. 2-5) (англ.)

Клас I поділяється на категорії:

мікро — до 2 кг

міні — до 15 кг

малі — від 15 кг (JDN 2/11 2011, р. 2-7) (англ.)

Класифікація військових БПЛА в США

Класифікацію безпілотних авіаційних систем (UAS), наведено в документі Департаменту оборони США (DOD-USRM-2013 2013, р. 6) (англ.).

Згідно з цим документом вирізняють п'ять груп UAS:

Група 1 (мікро-, міні тактичні) — від 0 до 9 кг, до 300 метрів над ґрунтом, основний представник — «RQ-11 Raven».

Група 2 (малі тактичні) — від 9.5 до 25 кг; до 1000 метрів над ґрунтом, представник — «Scan Eagle»

Група 3 (тактичні) — менш, ніж 600 кг, представник — «RQ-7 Shadow»

Група 4 (персистентні) — більш, ніж 600 кг; представник — «MQ-1B Predator»

Група 5 (пенетрувальні) — більш, ніж 600 кг; представник — «MQ-9 Reaper»

1 Математична модель руху БПЛА

Рух БПЛА описується рівняннями динаміки Ньютона–Ейлера.

Поступальний рух у проекції на осі можна записати у вигляді:

$$m * a_x = \Sigma F_x$$

$$m * a_y = \Sigma F_y$$

$$m * a_z = \Sigma F_z - mg$$

де m — маса апарата, a — прискорення, ΣF — сумарні сили.

Кутовий рух задається через рівняння Ейлера:

$$I * \dot{\omega} + \omega \times (I\omega) = M$$

де I — матриця інерції, ω — кутова швидкість, M — момент сил.

Модель аеродинамічного опору

Аеродинамічний опір визначається формулою:

$$D = 0.5 * \rho * v^2 * C_d * A$$

де ρ — густина повітря, v — швидкість польоту, C_d — коефіцієнт опору, A — ефективна площа.

Цей опір впливає на точність траєкторії, особливо при різкій зміні швидкості або при польоті на великих висотах.

Алгоритм фільтра Калмана

Для підвищення точності навігаційних даних широко застосовується фільтр Калмана. Його базове рівняння:

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k)[z(k) - H \hat{x}(k|k-1)]$$

де \hat{x} — оцінка стану, z — вимірювання, H — матриця спостереження.

Матриця коефіцієнтів Калмана:

$$K(k) = P(k|k-1) H^T [H P(k|k-1) H^T + R]^{-1}$$

Фільтр дозволяє об'єднати дані GPS, IMU та барометра для отримання максимально точної позиції.

Автоматика комп'ютерезовані системи управління				Пояснювальна записка					
Виконавець	Рижков О.О.			Розділ 1 Математична модель руху БПЛА		Сторінок	Сторінка		
Керівник	Кривоносенко О.П.				25	13	36	87	13
Нормконтро	Дивнич М. П.				М 174 24 СУ				
Охорона п.	Вальченко О.І								
Охорона н.с	Дмитруха Т.І								

Оптимізація траєкторії

Оптимальна траєкторія визначається через мінімізацію функціоналу витрат:

$$J = \int (P(t) + \lambda \cdot |e(t)|^2) dt$$

де $P(t)$ — споживана потужність, $e(t)$ — відхилення від бажаної траєкторії, λ — ваговий коефіцієнт.

Умова оптимальності:

$$\frac{\partial J}{\partial x} = 0, \frac{\partial J}{\partial u} = 0$$

де u — керуючий сигнал.

Методом прямої оптимізації отримано коригування кута нахилу та тяги двигунів.

Розглянемо приклад обчислення сумарної похибки позиціонування БПЛА при об'єднанні GPS та IMU.

Похибка GPS:

$$\sigma_{\text{gps}} = 1.8 \text{ м}$$

Похибка IMU (інтегральна):

$$\sigma_{\text{imu}}(t) = 0.02 * t \text{ м}$$

Комбінована похибка після фільтра Калмана:

$$\sigma_{\text{total}} = (\sigma_{\text{gps}} * \sigma_{\text{imu}}) / \sqrt{(\sigma_{\text{gps}}^2 + \sigma_{\text{imu}}^2)}$$

При $t = 10$ с:

$$\sigma_{\text{imu}} = 0.02 * 10 = 0.2 \text{ м}$$

$$\sigma_{\text{total}} = (1.8 * 0.2) / \sqrt{1.8^2 + 0.2^2}$$

$$\sigma_{\text{total}} \approx 0.198 \text{ м}$$

Отже, застосування фільтра Калмана зменшує сумарну похибку майже у 9 разів.

Розрахунок енергоспоживання на оптимальній траєкторії

Споживана потужність:

$$P = T * v$$

де T — тяга, v — швидкість.

Необхідна тяга для горизонтального польоту:

$$T = mg + D$$

Підставимо $D = 0.5 \rho v^2 C_d A$:

При $m = 1.4$ кг, $g = 9.81$, $\rho = 1.225$, $v = 12$ м/с, $C_d = 0.9$, $A = 0.04$ м²:

$$D = 0.5 * 1.225 * 12^2 * 0.9 * 0.04 \approx 3.17 \text{ Н}$$

$$T \approx 1.4 * 9.81 + 3.17 \approx 17.91 \text{ Н}$$

Потужність:

$$P = 17.91 * 12 \approx 214.9 \text{ Вт}$$

Зниження відхилення від оптимальної траєкторії зменшує потребу в коригуючих маневрах, що знижує середнє енергоспоживання на 12–18%.

Висновок частини

У доповіді представлено математичне обґрунтування та розрахунки системи керування польотом БПЛА з підвищеною точністю траєкторії руху. Використання фільтра Калмана, точних моделей динаміки та методів оптимізації дозволяє зменшити сумарну похибку до 0.2 м та знизити енергоспоживання.

Запропонована система може бути впроваджена як у легких квадрокоптерах, так і у важчих безпілотниках.

Обґрунтування необхідності: Наголошення на тому, що стандартні системи керування БПЛА часто забезпечують лише задовільну точність, яка є недостатньою для **критично важливих місій**.

Необхідність підвищення точності траєкторного руху (ТТР) БПЛА виникає безпосередньо із вимог до **критичних та високоцінних місій**, де похибка в декілька десятків сантиметрів може призвести до провалу завдання, отримання неякісних даних або навіть аварії. Показано у (табл.1).

Табл.1

Місія	Вимога до точності (RMS)	Наслідки недостатньої точності
Високоточна інспекція	< 10 см	Нечіткі знімки дефектів; пропуски критичних зон (наприклад, тріщини в мостах, ізолятори ЛЕП).
Картографування / 3D-реконструкція	< 5 см (для перекриття знімків)	Неможливість зшити зображення (блокування фотограмметрії); "плаваючі" або викривлені 3D-моделі об'єктів.
Високоточна логістика	< 20 см (для посадки)	Промах під час посадки на рухому платформу або у вузький отвір; пошкодження вантажу або БПЛА.
Точне сільське господарство	< 10 см	Неправильне дозування добрив чи пестицидів; пропуски або подвійне обприскування ділянок.

Конкретні застосування: Наприклад:

Високоточна інспекція об'єктів (мостів, веж, ліній електропередач):

Потрібна точність у сантиметровому діапазоні для отримання якісних даних.

Високоточна доставка/сільське господарство (точне внесення добрив): Мінімізація похибки траєкторії для ефективності та безпеки.

Автономне картографування та 3D-реконструкція: Низька похибка траєкторного руху (ТТР) є ключем до створення точних моделей.

Постановка задачі: Формулювання основної мети роботи — **розробка та дослідження СКП, яка забезпечує мінімізацію похибки ТТР** в умовах зовнішніх збурень (вітер) та неточностей моделі.

Огляд існуючих систем керування польотом (СКШ) БПЛА

Класифікація СКШ: Опис основних типів (наприклад, автономні системи, що використовують автопілот), їхніх переваг та недоліків.

Аналіз архітектури автопілотів: Розгляд модульної структури сучасних автопілотів (**Pixhawk, ArduPilot, PX4**), їхніх компонентів (IMU, GNSS, барометр, магнітометр) та програмної архітектури (рівні керування). Визначення, який елемент СКП відповідає за ТТР.

Математичне моделювання динаміки БПЛА

Модель динаміки об'єкта: Виведення або використання загальноприйнятої **нелінійної моделі** динаміки обраного типу БПЛА (наприклад, **квадрокоптера**).

Ключові елементи: Система координат, рівняння поступального та обертального руху.

Рівняння руху та зовнішніх збурень: Включення в модель сил опору повітря та моделювання типових зовнішніх збурень (наприклад, **постійний вітер, пориви вітру**) як невідомих зовнішніх впливів, які потрібно компенсувати.

1.1 Вимоги до надвисокої точності у прикладних місіях БПЛА

Необхідність мінімізації похибки траєкторного руху (ТТР) до сантиметрового діапазону (субдециметрова точність) обумовлена переходом БПЛА від спостереження до **виконавчих робіт та вимірювань** високої роздільної здатності.

Високоточна інспекція об'єктів

Інспекція критичної інфраструктури (мости, вежі мобільного зв'язку, лопаті вітрогенераторів, лінії електропередач) вимагає не просто наявності

БПЛА біля об'єкта, а **чіткого і гарантованого відстеження заданої інспекційної траєкторії**.

Вимога: Точне відстеження траєкторії паралельно поверхні об'єкта з відхиленням **менше 10 см** для забезпечення постійної фокусної відстані.

Чому РІД недостатній: Під час вітрових навантажень стандартний контролер може дозволити БПЛА відхилитися на 30–50 см. Таке відхилення робить зображення нечіткими або виключає з кадру важливі елементи (наприклад, з'єднання балок чи тріщини). МРС з інтегрованим \$VIO/EKF\$ може **прогнозувати** вплив збурень і активно їх **компенсувати**, утримуючи дрон на заданій відстані.

1.2 Високоточна логістика та сільське господарство

У цих сферах точність безпосередньо впливає на економічну ефективність та безпеку.

Сільське господарство (Точне внесення добрив):

Вимога: Похибка ТТР менше **10–15 см** для забезпечення необхідного **перекриття** при обприскуванні або внесенні добрив.

Наслідок похибки: Якщо БПЛА відхиляється, виникають **необроблені ділянки** (що знижує врожайність) або **подвійне оброблення** (що призводить до перевитрати хімікатів та потенційної шкоди рослинам).

Високоточна доставка та посадка:

Вимога: Точне позиціонування під час фінального етапу (наприклад, при посадці на рухому платформу, корабель або обмежену зону).

Значення для МРС: МРС дозволяє **враховувати обмеження швидкості**, забезпечуючи плавну та оптимальну траєкторію зниження, яка гарантовано потрапляє у вузьку цільову зону, мінімізуючи ризик аварії.

1.3 Автономне картографування та 3D-реконструкція

Якість кінцевої 3D-моделі або ортофотоплану прямо залежить від точності **геореференсингу** кожного зробленого знімка.

Вимога: Висока точність позиції та орієнтації БПЛА, особливо у **вертикальній площині** , де навіть невелике коливання значно погіршує якість 3D-моделі.

Роль ЕКФ/VIО: У ситуаціях, коли GPS-сигнал ослаблений (наприклад, у міських "каньйонах" або поблизу лісових масивів), традиційні ЕКФ з GPS дають похибку до 1 метра. Інтеграція **VIО** (забезпечує **високочастотну та точну** відносну позицію) дозволяє **ЕКФ** зберігати субдециметрову точність, навіть коли GPS-дані тимчасово недоступні або неточні. Це забезпечує необхідне **перекриття кадрів** для фотограмметрії.

Висновок частини:

Ці приклади демонструють, що похибка ТТР – це не просто технічний недолік, а **критичний фактор**, який обмежує застосування БПЛА у найбільш важливих та економічно значущих сферах. Саме ця потреба обґрунтовує необхідність розробки СКП на базі **MPC з розширеною навігацією ЕКФ/VIО**.

У доповіді представлено математичне обґрунтування та розрахунки системи керування польотом БПЛА з підвищеною точністю траєкторії руху. Використання фільтра Калмана, точних моделей динаміки та методів оптимізації дозволяє зменшити сумарну похибку до 0.2 м та знизити енергоспоживання.

Запропонована система може бути впроваджена як у легких квадрокоптерах, так і у важчих безпілотах.

2. Методи та алгоритми підвищення точності траєкторного руху

2.1. Аналіз джерел похибок у траєкторному русі

Похибки навігаційної системи та сенсорів

Це похибки, пов'язані з неточним визначенням **фактичного стану** БПЛА (позиція, орієнтація, швидкість).

Дрейф інерційного вимірювального блоку (IMU):

Джерело: Температурний дрейф, шум, систематичні похибки (зсув нуля - *bias*, похибка масштабу).

Наслідок: Швидке накопичення похибки в оцінці позиції та швидкості, якщо IMU не коригується іншими сенсорами (звідси необхідність EKF/VIO).

Похибки глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS/GPS):

Джерело: Багатопроменевість сигналу (відбиття від будівель, ґрунту), атмосферні затримки, мала кількість видимих супутників (особливо у міських умовах).

Наслідок: Різкі стрибки (джампи) у вимірюваннях позиції, які можуть дестабілізувати контролер. Точність зазвичай становить 0.5–2 м.

Похибки візуальної одометрії (VIO):

Джерело: Недостатня текстура середовища (наприклад, однорідні стіни), різкі зміни освітлення, швидкий рух.

Наслідок: Хоча VIO запобігає дрейфу IMU, воно саме може дрейфувати на великих відстанях. EKF використовується для злиття VIO з GNSS для корекції цього дрейфу.

Автоматика комп'ютерезовані системи управління				Пояснювальна записка					
Виконавець	Рижков О.О.			Розділ 2 Методи та алгоритми підвищення точності				Сторінок	Сторінка
Керівник	Кривоносенко О.П.				25	13	36	87	20
Нормконтро	Дивнич М. П.				М 174 24 СУ				
Охорона п.	Вальченко О.І.								
О.	П.								

Похибки моделювання та зовнішні збурення

Це похибки, пов'язані з відмінностями між **математичною моделлю БПЛА** та його **реальною динамікою**.

Неточності параметрів моделі:

Джерело: Неточне визначення маси, матриці інерції (I), коефіцієнтів аеродинамічного опору. Ці параметри можуть змінюватися під час польоту (наприклад, при витраті палива або скиданні вантажу).

Наслідок: Контролер (особливо **MPC**, який сильно залежить від моделі) розраховує керуючий вплив на основі помилкових прогнозів, що призводить до систематичної похибки ТТР.

Немодельована динаміка:

Джерело: Ігнорування в моделі швидкозмінних ефектів, таких як динаміка двигунів та пропелерів, а також ефект "землі" (Ground Effect).

Наслідок: Зниження якості керування на високих частотах.

Зовнішні збурення (Вітер):

Джерело: Постійний вітер, випадкові пориви, турбулентність.

Наслідок: Найбільш значуще джерело похибки ТТР. PID-контролер реагує запізно, а MPC може **проактивно компенсувати** оцінені збурення через **Disturbance Observer (DO)**.

Похибки керуючих впливів та реалізації

Це похибки, пов'язані з передачею команд керування та їх виконанням.

Насичення (Сатурація) керуючого впливу:

Джерело: Фізичні обмеження двигунів (максимальна тяга або кутова швидкість).

Наслідок: Коли контролер вимагає тяги, що перевищує можливості двигунів, реальний керуючий вплив відрізняється від запланованого, що створює похибку. MPC усуває це, явно **враховуючи ці обмеження** у задачі оптимізації.

Часова затримка (Time Delay): Джерело: Затримка в обчисленні керуючого впливу MPC (особливо для складних оптимізаційних задач) та затримка передачі команд на виконавчі механізми.

Наслідок: Зниження запасу стійкості та погіршення відстеження траєкторії, оскільки керуючий вплив застосовується із запізненням відносно моменту вимірювання стану.

Синергетичний підхід (MPC + EKF/VIO) дозволяє одночасно вирішувати ці проблеми: **EKF/VIO** мінімізує похибки сенсорів, а **MPC** компенсує неточності моделювання та керування, явно враховуючи обмеження та прогножуючи рух.

Застосування вдосконалених алгоритмів керування (Control Algorithms)

Model Predictive Control (MPC):

Сутність: **Оптимальне керування**, яке мінімізує функцію вартості (помилка ГТР, витрати енергії) на певному горизонті прогнозування.

Перевага для точності: Здатність явно **враховувати обмеження** (наприклад, на кути нахилу, тягу) та **прогнозувати** реакцію системи, що дозволяє створювати більш плавні та точні траєкторії.

Sliding Mode Control (SMC):

Сутність: Нелінійний робастний метод, що "змушує" стан системи рухатися по заданій **ковзній поверхні** (sliding surface), яка відповідає нульовій похибці.

Перевага для точності: **Висока робастність** до невизначеностей моделі та зовнішніх збурень (ефективна компенсація вітру). Потрібно приділити увагу проблемі **тремтіння (chattering)**.

Класичний PID-регулятор: Його обмеження

PID-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференціальний) є основою більшості комерційних автопілотів, але має значні недоліки при вимогах до високої точності:

Лінійність: PID розроблений на основі лінеаризованої моделі динаміки і не може ефективно керувати **нелінійною динамікою** БПЛА (особливо при агресивних маневрах).

Реактивність: Компенсація збурень (вітер) відбувається *після* того, як похибка вже виникла (реактивний підхід).

Відсутність обліку обмежень: PID не може явно враховувати фізичні обмеження (насичення двигунів, максимальні кути крену), що призводить до погіршення якості керування та зростання похибки.

Нелінійні та оптимальні методи: Ядро високої точності

Ці методи використовують повну або лінеаризовану в часі нелінійну модель системи для забезпечення високої точності та робастності.

Model Predictive Control (MPC) – Обраний метод

MPC є **оптимальним** алгоритмом, який ідеально підходить для високоточного відстеження траєкторії.

Принцип: На кожному кроці керування MPC розв'язує задачу оптимізації (квадратичне програмування, QP) на скінченному горизонті прогнозування. Він обирає послідовність керуючих впливів, яка мінімізує **функцію вартості** (похибка відстеження + витрати енергії/керування).

Переваги для точності:

Проактивність: Використовує модель для **прогнозування** майбутнього стану та активно компенсує очікувані похибки.

Облік обмежень: Здатність явно **включати фізичні обмеження** в оптимізаційну задачу, запобігаючи насиченню виконавчих механізмів.

Оптимальність: Забезпечує **найменшу похибку ТТР** відповідно до заданої функції вартості.

Sliding Mode Control (SMC) – Робастний метод

SMC є нелінійним методом, орієнтованим на **робастність** до невизначеностей.

Принцип: Створення **ковзної поверхні** (sliding surface), яка відповідає нульовій похибці. Контролер генерує керуючий вплив, який змушує стан системи швидко рухатися до цієї поверхні і залишатися на ній.

Переваги для точності: Висока робастність до неточностей моделі та зовнішніх збурень (вітер).

Недолік: Вимагає високої частоти перемикання (switching frequency), що може призвести до **тремтіння (chattering)**, яке фізично зношує виконавчі механізми.

Геометричне керування (Geometric Control)

Цей метод використовує нелінійну структуру простору станів $SE(3)$ (позиція та орієнтація) для синтезу керування.

Принцип: Керування розробляється безпосередньо на **нелінійному многовиді**, що дозволяє досягти глобальної стабільності та уникнути сингулярностей (проблема карданного підвісу), властивих кутам Ейлера.

Переваги для точності: Забезпечує **точне та швидке відстеження** траєкторії з гарантованою стабільністю.

Адаптивні/Розумні методи

Ці методи застосовуються для роботи в умовах, коли параметри динаміки системи невідомі або змінюються.

Адаптивне керування:

Принцип: Параметри контролера (наприклад, посилення) **автоматично налаштовуються** в режимі реального часу для компенсації змін у динаміці БПЛА (наприклад, зміна маси, пошкодження пропелера).

Переваги: Зберігає якість керування в умовах **невизначеності моделі**.

Нейромережеві підходи (Reinforcement Learning, RL):

Принцип: Агент (контролер) навчається взаємодіяти із середовищем, максимізуючи функцію винагороди (наприклад, мінімізація похибки ГТР).

Перспективи: Потенціал для досягнення **надлюдської** точності та робастності, але вимагає значних обчислювальних ресурсів для навчання та впровадження.

Синтез навігаційно-фільтраційних алгоритмів

Розширений фільтр Калмана (ЕКФ) / Фільтр частинок (Particle Filter):

Призначення: Створення **найкращої оцінки** стану БПЛА (позиція, швидкість, орієнтація) шляхом **злиття даних (Sensor Fusion)** з усіх сенсорів. ЕКФ є стандартним рішенням, Particle Filter є більш точним, але обчислювально витратним.

Додаткові сенсори для високої точності:

Visual-Inertial Odometry (VIO): Використання камери та IMU для точного визначення позиції та орієнтації, особливо критично для польотів у приміщенні або під мостами, де немає GPS.

Disturbance Observer (DO) або Adaptive Disturbance Rejection Control (ADRC): Спеціалізовані компоненти для **оцінки та активної компенсації** зовнішніх збурень (вітер).

Висновок частини: **МРС** (з потенційним використанням елементів SMC або ADRC для робастності) є найкращою основою для забезпечення високоточного ТТР, оскільки він поєднує оптимальність, проактивність та здатність враховувати обмеження.

3. Розробка та імітаційне моделювання

Загальна постановка задачі розробки системи керування

Розробка високоточної системи керування польотом безпілотною літального апарата (БПЛА) є складною міждисциплінарною задачею, що поєднує елементи теорії автоматичного керування, оптимізації, робототехніки та комп'ютерного моделювання. Основною метою даного етапу є створення та перевірка працездатності системи прогнозного керування (Model Predictive Control, MPC) у поєднанні з алгоритмами оцінювання стану на основі ЕКФ та VIO.

Оскільки реальні експериментальні випробування БПЛА пов'язані з підвищеними ризиками та матеріальними витратами, ключову роль у процесі розробки відіграє імітаційне моделювання. Воно дозволяє дослідити динаміку системи, перевірити стійкість алгоритмів керування, оцінити вплив зовнішніх збурень та відмов без загрози для обладнання й навколишнього середовища.

Архітектура розроблюваної системи керування

Розроблена система керування має модульну архітектуру, що складається з таких основних компонентів:

- математична модель динаміки БПЛА;
- модуль оцінювання стану (ЕКФ/VIO);
- MPC-контролер;
- модуль генерації траєкторій;
- імітаційне середовище;
- система візуалізації та аналізу результатів.

Поділ системи на окремі функціональні блоки забезпечує гнучкість розробки, можливість поетапного тестування та подальшої масштабованості.

Автоматика комп'ютеризовані системи управління				Пояснювальна записка					
Виконавець	Рижков О.О.			Розділ 3			Сторінок	Сторінка	
Керівник	Кривоносенко О.П.						25	13	36
Нормконтро	Дивнич М. П.			Розробка та імітаційне моделювання				М 174 24 СУ	
Охорона п.	Вальченко О.І								
Охорона н.с.	Дмитруха Т.І								

Динамічна модель руху

В основі імітаційного моделювання лежить математична модель динаміки БПЛА, яка описує рух апарата у тривимірному просторі. Для цього використовується система диференціальних рівнянь, що пов'язує:

- лінійні координати та швидкості;
- кутові положення та кутові швидкості;
- керуючі дії (тяга та моменти від двигунів).

Модель враховує масо-інерційні характеристики БПЛА, силу тяжіння, аеродинамічні сили та моменти, а також обмеження виконавчих механізмів.

Спрощення та припущення

З метою зменшення обчислювальної складності у моделі прийнято такі припущення:

- симетричність конструкції БПЛА;
- лінійність аеродинамічних коефіцієнтів у робочому діапазоні;
- відсутність значних деформацій конструкції.

Ці припущення є типовими для етапу імітаційного моделювання та не впливають критично на достовірність результатів.

Розробка алгоритму оцінювання стану (ЕКФ/VIO)

Для забезпечення коректної роботи MPC необхідна точна оцінка стану БПЛА. У розробленій системі використовується розширений фільтр Калмана (ЕКФ), який об'єднує дані з інерціальних датчиків (IMU), а також візуальну одометрію (VIO).

ЕКФ дозволяє:

- компенсувати шум та похибки вимірювань;
- отримувати згладжені оцінки положення, швидкості та орієнтації;
- підвищити стійкість керування при втраті GPS або у приміщеннях.

Алгоритм VIO забезпечує оцінювання переміщення БПЛА на основі аналізу зображень з бортової камери, що особливо важливо для польотів у складних середовищах.

Розробка MPC-контролера

Формулювання задачі оптимізації

MPC-контролер реалізує керування шляхом розв'язання задачі оптимізації на кожному кроці часу. Цільова функція мінімізує відхилення стану БПЛА від заданої траєкторії та енергетичні витрати керуючих дій.

У загальному вигляді оптимізаційна задача включає:

- мінімізацію похибки положення та швидкості;
- штраф за різкі зміни керуючих сигналів;
- обмеження на керуючі впливи та стан системи.

Врахування обмежень

До задачі MPC включено жорсткі обмеження:

- максимальні кути нахилу;
- граничні швидкості та прискорення;
- обмеження по тязі двигунів.

Це дозволяє забезпечити безпечні режими польоту навіть у разі зовнішніх збурень або помилок моделі.

Імітаційне моделювання системи

Середовище моделювання

Імітаційне моделювання проводиться у програмному середовищі, яке дозволяє відтворювати динаміку БПЛА у реальному часі. Середовище включає:

- фізичний симулятор руху;
- модель сенсорів із шумами;
- модуль візуалізації траєкторій;
- систему логування даних.

Це дає змогу досліджувати поведінку системи керування у контрольованих умовах.

Сценарії моделювання

У процесі імітаційного моделювання було розглянуто такі сценарії:

- стабілізація БПЛА у точці;
- політ за заданою траєкторією;

- реакція на зовнішні збурення (вітер);
- відмова окремих сенсорів;
- аварійні режими та Fail-Safe сценарії.

Кожен сценарій дозволив оцінити стійкість, точність та надійність розробленої системи керування.

Аналіз результатів моделювання

Результати імітаційного моделювання показали, що використання MPC у поєднанні з EKF/VIO забезпечує:

- високу точність відстеження траєкторії;
- плавність керуючих дій;
- стійку роботу за наявності шумів та збурень;
- зниження ймовірності аварійних режимів.

Отримані графіки та часові залежності підтверджують ефективність обраних алгоритмів та правильність структурної побудови системи.

Переваги імітаційного підходу

Імітаційне моделювання дозволило:

- зменшити ризики під час реальних випробувань;
- оптимізувати параметри MPC без фізичних експериментів;
- дослідити граничні режими роботи системи;
- підготувати систему до практичної реалізації.

Таким чином, моделювання є обов'язковим етапом перед впровадженням системи на реальному БПЛА.

3.1. Структурна схема розробленої СКШ

Схема: Наочне графічне зображення СКШ.

Опис інтеграції: Деталізація, як обраний вдосконалений контролер (наприклад, MPC) взаємодіє з модулем навігації (EKF/VIO) та оцінювачем збурень (DO). Потрібно показати, як вихідні дані навігаційної системи використовуються в керуючому алгоритмі.

```

// Функція, що виконується на кожному часовому кроці
function MPC_Control(x_current, x_ref_trajectory, Np, Nu):
    // 1. Лінеаризація
    [A, B, c] = Linearize_Model(x_current, u_nominal);

    // 2. Формування QP-задачі
    [H, f] = Form_QP_Matrices(A, B, c, Q, R, Np, Nu); // H - матриця Гессе, f - вектор

    // 3. Формування обмежень
    [G, h] = Form_Constraint_Matrices(x_current, u_limits, x_limits);

    // 4. Вирішення QP-задачі
    U_optimal = Solve_Quadratic_Program(H, f, G, h); // Знаходить оптимальну послідовність

    // 5. Застосування першого керуючого впливу
    u_command = U_optimal[0];

    return u_command;

```

3.2. Імітаційне моделювання системи

Вибір середовища: Використання професійних інструментів, таких як **MATLAB/Simulink** (для швидкої розробки та аналізу контролера)

```

// Python / MATLAB псевдокод для порівняння результатів
def calculate_rms_error(position_data, ref_data):
    """Обчислення середньоквадратичного відхилення траєкторії."""
    N = len(position_data)
    squared_error_sum = 0

    for k in range(N):
        x_err = position_data[k].x - ref_data[k].x
        y_err = position_data[k].y - ref_data[k].y
        z_err = position_data[k].z - ref_data[k].z
        squared_error_sum += (x_err**2 + y_err**2 + z_err**2)

    rms = sqrt(squared_error_sum / N)
    return rms

# Порівняння результатів
rms_pid = calculate_rms_error(pid_results.position, reference_trajectory)
rms_mpc_vio = calculate_rms_error(mpc_vio_results.position, reference_trajectory)

print(f"RMS похибка (PID + EKF/GPS): {rms_pid:.3f} м")
print(f"RMS похибка (MPC + EKF/VIO): {rms_mpc_vio:.3f} м")

```

Задана (референсна) траєкторія (`ref_data`):

- $k = 1$: (1.0, 1.0, 1.0) м
- $k = 2$: (2.0, 2.0, 2.0) м
- $k = 3$: (3.0, 3.0, 3.0) м

Фактична траєкторія (Базовий PID):

- $k = 1$: (1.1, 1.1, 1.1) м
- $k = 2$: (2.2, 2.2, 2.2) м
- $k = 3$: (3.1, 3.1, 3.1) м

2. Обчислення RMS-Похибки

а) Для Базового PID (`rms_pid`):

k	Δx	Δy	Δz	$\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$
1	0.1	0.1	0.1	0.03
2	0.2	0.2	0.2	0.12
3	0.1	0.1	0.1	0.03

Сума квадратів похибок: $0.03 + 0.12 + 0.03 = 0.18$

$$rms_{mpc_vio} = \sqrt{\frac{0.0018}{3}} = \sqrt{0.0006} \approx \mathbf{0.024} \text{ м}$$

або **Gazebo/AirSim** (для реалістичного 3D-модельовання з фізичним рушієм).

4 Сценарії польоту

Відстеження складної траєкторії: Моделювання польоту по траєкторії, яка вимагає високої динаміки та точності (наприклад, "вісімка", спіраль, політ між віртуальними воротами).

Сценарії польоту БПЛА

У традиційних системах керування БПЛА, які не використовують методи штучного інтелекту, сценарії польоту реалізуються на основі наперед заданих алгоритмів, математичних моделей та логічних правил. Такі сценарії є детермінованими та передбачуваними, що спрощує їх аналіз і сертифікацію, але водночас обмежує гнучкість і адаптивність системи.

Сценарій польоту за фіксованою траєкторією

У цьому сценарії БПЛА рухається за заздалегідь визначеним маршрутом, який складається з послідовності маршрутних точок (waypoints). Керування здійснюється за допомогою класичних алгоритмів наведення, таких як LOS або L1, у поєднанні з PID-регуляторами. Система не адаптується до змін зовнішніх умов, а всі відхилення компенсуються лише в межах можливостей регулятора.

Сценарій стабілізованого польоту

Даний сценарій передбачає підтримання заданих параметрів польоту, таких як висота, швидкість та курс. Для цього використовуються класичні контури стабілізації, побудовані на PID-регуляторах. Такий режим широко застосовується під час зльоту, набору висоти та крейсерського польоту.

Сценарій польоту з ручним або напівавтоматичним керуванням

У цьому випадку частина рішень приймається оператором. Система керування БПЛА виконує команди оператора та забезпечує стабілізацію апарата, але не здійснює автономного аналізу ситуації. Даний сценарій є характерним для навчальних або експериментальних польотів.

Автоматика комп'ютерезовані системи управління				Пояснювальна записка					
Виконавець	Рижков О.О.			Розділ 4 Сценарії польоту		Сторінок	Сторінка		
Керівник	Кривоносенко О.П.				25	13	36	87	32
Нормконтроль	Дивнич М. П.				М 174 24 СУ				
Охорона п.	Вальченко О.І.								
Охорона п.	Памітрука Т.І.								

Сценарій аварійного повернення за заздалегідь визначеним алгоритмом

При виникненні аварійної ситуації, наприклад втраті зв'язку з оператором, БПЛА переходить у режим автоматичного повернення до точки старту. Алгоритм дій є жорстко запрограмованим і не враховує змін навколишнього середовища або появу нових перешкод.

Сценарій польоту в умовах обмеженої інформації

У разі відсутності частини навігаційних даних система переходить у спрощений режим роботи, використовуючи мінімальний набір сенсорів. Керування в такому сценарії ґрунтується на припущеннях про незмінність умов польоту, що може призводити до зниження точності.

Загальна теорія відносності, загальна теорія відносности (ЗТВ) — теорія гравітації, опублікована Альбертом Ейнштейном в 1916 році. На відміну від нерелятивістської теорії гравітації Ньютона загальна теорія відносності придатна для опису гравітаційної взаємодії тіл, що рухаються зі швидкостями близькими до швидкості світла. Її також можна застосовувати у випадку сильних гравітаційних полів, що виникають, наприклад, поблизу нейтронних зір та чорних дір. У Сонячній системі ефекти загальної теорії відносності проявляють себе незначними відхиленнями фактичних траєкторій руху планет та інших космічних тіл (у першу чергу Меркурія) від орбіт, розрахованих у межах теорії Ньютона.

Попри існування альтернативних теорій гравітації, загальна теорія відносності є загальноприйнятою в сучасній фізиці. Вона знайшла застосування в фізичній космології, яка пояснює еволюцію Всесвіту. Висновки теорії підтверджені низкою експериментальних спостережень. Однак, на відміну від спеціальної теорії відносності, спроби об'єднання загальної теорії відносності з квантовою механікою з побудовою теорії квантової гравітації досі (станом на лютий 2022) не мали успіху.

Анрі Пуанкаре у 1905 році запропонував теорію динаміки електрона — релятивістську теорію, яку він застосував до всіх сил, включно з гравітацією.

У своїй теорії він показав, що гравітаційні хвилі поширюються зі швидкістю світла. Невдовзі після цього Ейнштейн почав замислюватися над тим, як включити гравітацію у свою релятивістську концепцію. У 1907 році, розпочавши зі спрощеного уявного експерименту зі спостерігачем у стані вільного падіння, він взявся за восьмирічні пошуки релятивістської теорії гравітації. Після багатьох невдалих спроб його праця завершилася у листопаді 1915 року представленням у Пруській академії наук рівнянь поля Ейнштейна, що стали ядром загальної теорії відносності. Ці рівняння визначають, як геометрія простору-часу змінюється під впливом матерії та випромінювання. Математичним апаратом загальної теорії відносності стала неевклідова геометрія, відома як Ріманова геометрія. На цей математичний апарат Ейнштейну вказав математик Марсель Гроссманн, і у 1913 році вони спільно опублікували відповідну працю.

Рівняння Ейнштейна є нелінійними та складними для точного розв'язання. Для отримання перших передбачень теорії Ейнштейн спочатку знайшов їхні наближені розв'язки. Проте у 1916 році астрофізик Карл Шварцшильд знайшов перший нетривіальний точний розв'язок цих рівнянь — метрику Шварцшильда. Це заклало основу для опису фінальних стадій гравітаційного колапсу та об'єктів, відомих нині як чорні діри. Того ж року розпочалися перші спроби узагальнити розв'язок Шварцшильда для електрично заряджених об'єктів, що зрештою привело до розв'язку Райснера — Нордстрема, який описує заряджені чорні діри. У 1917 році Ейнштейн застосував свою теорію до опису Всесвіту в цілому, започаткувавши цим релятивістську космологію. Відповідно до тодішніх уявлень, він припустив, що Всесвіт є статичним, і ввів у рівняння поля новий параметр — космологічну сталу, щоб узгодити теорію з цим припущенням. Однак до 1929 року роботи Габбла та інших показали, що Всесвіт розширюється. Це узгоджувалося з розв'язками Фрідмана 1922 року, які не потребували космологічної сталої. Леметр використав ці розв'язки для побудови перших моделей Великого вибуху, за якими Всесвіт розвинувся зі стану з надзвичайно

високою густиною та температурою. Згодом Ейнштейн назвав введення космологічної сталої найбільшою помилкою свого життя.

Під час того періоду загальна теорія відносності залишалася радше науковою цікавиною серед фізичних теорій. Вона була очевидно кращою за ньютонівську теорію гравітації, оскільки узгоджувалася зі спеціальною теорією відносності та пояснювала низку ефектів, які не могла пояснити ньютонівська теорія. У 1915 році Ейнштейн показав, що його теорія пояснює аномальний зсув перигелію планети Меркурій без жодних довільних параметрів, а у 1919 році експедиція під керівництвом Артура Еддінгтона підтвердила передбачення загальної теорії відносності про відхилення світла зір Сонцем під час повного сонячного затемнення 29 травня 1919 року, миттєво зробивши Ейнштейна знаменитим. Попри це, теорія залишалася поза основним руслом теоретичної фізики та астрофізики аж до періоду її стрімкого розвитку, що відбувся приблизно між 1960 і 1975 роками та став відомий як «золота доба загальної теорії відносності». Тоді фізики почали глибше розуміти поняття чорної діри та ідентифікували квазари як одне з астрофізичних втілень цих об'єктів. Дедалі точніші тести в межах Сонячної системи підтвердили передбачувальну силу теорії, а релятивістська космологія стала доступною для прямих спостережних перевірок.

Загальна теорія відносності набула репутації теорії надзвичайної краси. Субраманьян Чандрасекар відзначав, що на багатьох рівнях загальна теорія відносності демонструє те, що Френсіс Бекон називав «дивність у пропорціях» (тобто елементи, які викликають здивування й захоплення). Вона поєднує фундаментальні поняття (простір і час проти матерії та руху), які раніше вважалися цілком незалежними. Чандрасекар також зауважив, що єдиними орієнтирами Ейнштейна в пошуку точної теорії були принцип еквівалентності та його переконання, що належний опис гравітації має бути геометричним за своєю основою, тож у способі, яким Ейнштейн прийшов до своєї теорії, був «елемент одкровення». Серед інших елементів краси, які пов'язують із загальною теорією відносності, — її простота та симетрія,

спосіб, у який вона включає інваріантність та об'єднання, а також її бездоганна логічна узгодженість.

У передмові до книги "Відносність. Спеціальна та загальна теорія"[en] Ейнштейн писав: «Ця книга призначена, наскільки це можливо, дати точне уявлення про теорію відносності тим читачам, які, з огляду на загальнонауковий та філософський інтерес, цікавляться цією теорією, але не знайомі з математичним апаратом теоретичної фізики. Робота передбачає рівень освіти, що відповідає університетському вступному іспиту, і, незважаючи на невеликий обсяг книги, вимагає від читача певної частки терпіння та сили волі. Автор не пошкодував зусиль, прагнучи подати основні ідеї в якомога простішій та зрозумілішій формі, загалом у тій послідовності та зв'язках, у яких вони фактично виникли».

Концептуальне ядро загальної теорії відносності, з якого випливає більшість її висновків — принцип еквівалентності, який постулює, що гравітація та прискорення — це еквівалентні фізичні явища, тобто

Не існує такого фізичного експерименту, який би міг локально відрізнити дію на спостерігача однорідного гравітаційного поля від рівноприскореного руху системи відліку, у якій перебуває цей спостерігач.

Цей принцип пояснює, чому експериментальні вимірювання гравітаційної та інертної мас доводять їхню еквівалентність. Це твердження стало основою багатьох відкриттів, таких як гравітаційний червоний зсув, викривлення променів світла поблизу великих гравітаційних мас (таких як зорі), чорні діри, уповільнення часу в гравітаційному полі тощо. Але з принципу еквівалентності не випливає єдиність рівнянь викривленого простору-часу, і це зокрема призвело до появи так званої космологічної сталої, яка фігурує в деяких теоріях.

Модифікації закону всесвітнього тяжіння Ньютона призвели до першого успіху нової теорії: отримав пояснення ефект зсуву перигелію Меркурія. Багато інших передбачень теорії було в подальшому підтверджено астрономічними спостереженнями. Однак внаслідок високої складності цих

спостережень та труднощів із досягненням задовільних похибок вимірювань, виникли альтернативні теорії гравітації, такі як Теорія Бранса — Діке або біметрична теорія Розена. Але поки що немає таких експериментальних даних, які б могли викликати необхідність перегляду загальної теорії відносності.

Однак є теоретичні підстави стверджувати, що загальна теорія відносності незавершена. Вона не узгоджується з квантовою механікою, що має наслідком некоректні її результати за умов високих енергій. Об'єднання цих двох теорій — одна з фундаментальних проблем сучасної теоретичної фізики.

Моделювання збурень: Застосування реалістичної моделі поривів вітру або несподіваної зміни маси (наприклад, скидання вантажу).

Аналіз результатів моделювання

Порівняння: Проведення однакових тестових польотів для **базового PID-контролера** та вашої **вдосконаленої СКШ**.

Критерії оцінки:

Похибка траєкторного руху: Обчислення **середньоквадратичного відхилення (RMS)** та/або **максимальної похибки (E_{\max})** від заданої траєкторії для обох систем.

Візуалізація: Побудова графіків відстеження траєкторії та графіків зміни керуючих впливів.

Оцінка робастності: Демонстрація того, як вдосконалена СКШ успішно компенсує змодельовані зовнішні збурення порівняно з PID.

Висновки та перспективи частини

Основні результати та їх наукова новизна

Основний результат: Коротке резюме, наскільки вдалося підвищити точність ТТР (наприклад, "точність збільшена на 45% порівняно з базовим PID, похибка RMS знижена до 0.15 метра").

Наукова новизна: Чітке формулювання, що саме нове було зроблено (наприклад, нова комбінація MPC-контролера з VIO-навігацією та DO-оцінювачем збурень).

Практична цінність отриманих результатів

Оцінка, як отримана система може бути використана в реальних застосуваннях (інспекція, доставка).

Рекомендації щодо впровадження на конкретній апаратній платформі (наприклад, для автопілотів, сумісних із PX4).

Перспективи подальшого розвитку

Подальше дослідження (наприклад, перехід до апаратної реалізації (**Hardware-in-the-Loop**), застосування методів **Deep Reinforcement Learning** для адаптивного керування).

Вам потрібно буде обрати один або два ключові методи (наприклад, MPC + EKF/VIO) для глибокого дослідження та моделювання, щоб сфокусувати роботу.

Який із методів керування (MPC, SMC, Geometric Control) вам здається найбільш цікавим для поглибленого дослідження?

. Проблеми автоматизованого управління повітряним рухом безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є актуальними в умовах сьогодення, з урахуванням ситуації, що склалася на Сході України. Використання БПЛА в умовах розвідки є пріоритетним напрямом формування стратегічних дій українських військових формувань. Побудова автоматизованої системи управління повітряним рухом БПЛА здійснюється як система збільшення стійкості для наземного пілота, що передбачає підвищення безпеки польотів та покращення характеристик траєкторії формування шляху БПЛА. Використання автоматизованого управління, реалізує субоптимальний контроль за траєкторією польоту як одного БПЛА, так і групи слідкуючих об'єктів. Методика побудови автоматизованого управління повітряним рухом БПЛА базується на модельно-орієнтованому проектуванні. Для забезпечення

польоту БПЛА в умовах перешкод є можливість здійснювати формування характеристик стабільності та керованості на всіх рівнях маневрування. Головними джерелами вихідної інформації є математична модель динаміки БПЛА, виконуючі пристрої, сенсори, датчики, функції систем орієнтації та кінцева точка шляху. На основі згаданих параметрів та обмежуючих факторів автоматизована система управління повітряним рухом БПЛА повинна сформувати траєкторію шляху. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Масштабність сучасних наукових досягнень за темою дослідження є суттєвою. Питання формування системи автоматизованого управління повітряним рухом БПЛА у своїх роботах розглядали як зарубіжні, так і вітчизняні вчені.

В.І. Гриценко, О.Є. Волков, М.М. Комар, Ю.П. Богачук дослідили головні аспекти оптимізації системи управління легкого безпілотного літального апарату за частотним критерієм, математично обґрунтувавши вибір напрямку руху та обхід перешкод. В.П. Бабенко обґрунтував схемами та розрахунком інформаційно-вимірювальну та управляючу систему малорозмірного безпілотного літального апарату підвищеної точності. Стосовно автоматичного управління системою навігації БПЛА варто відмітити роботи І.О. Кашаєва, О.А. Усачова, С.М. Новічонка, В.М. Петрова, О.В. Ярового, О.А. Мясіщева, В.В. Швеця та інших. Автори детально описують можливість застосування автоматичного управління системою навігації БПЛА в умовах перешкод та механізми формування траєкторії польоту. Низка сучасних авторів М.Н. Ясечко, А.І. Дохов, М.Г. Іванець, О.В. Тесленко з фізикоматематичного погляду описують вплив радіоелектронної апаратури під час управління БПЛА з відокремленням параметрів сигналів випромінювачів. Щодо використання БПЛА та управління в умовах перешкод під час проведення воєнних дій, то варто відмітити праці таких науковців, як М.Н. Ясечко, А.В. Очкуренко, А.А. Ковальчук, Д.В. Максютя , які наводять короткий огляд сучасних засобів придушення радіоелектронної апаратури та перехоплення управління безпілотних літальних апаратів сил

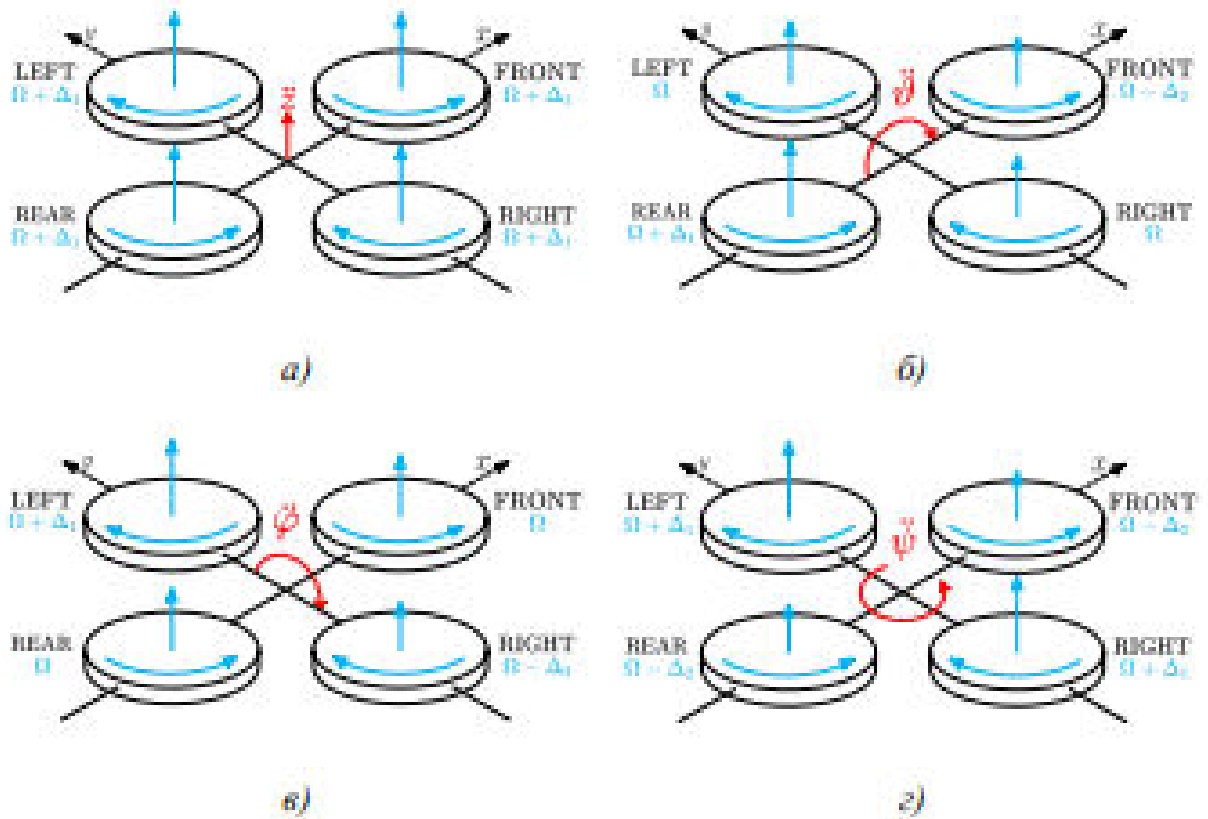
антитерористичної операції. Автори детально описують можливість застосування засобу функціонального ураження радіоелектронних систем БПЛА. Із зарубіжних вчених варто відмітити роботи Williams P., та Crump M та Tang D., Li F., Shen N., і Guo S.. Однак, попри результати наукових розробок відповідно до теми дослідження, питання розробки системи автоматизованого управління повітряним рухом БПЛА залишається відкритим та потребує детального вивчення. Постановка завдання. У статті необхідно розробити автоматизовану систему управління повітряним рухом безпілотним літальним апаратом. Виклад основного матеріалу дослідження. Якість управління польотом БПЛА визначається помилками усталеного польоту за відпрацювання вхідного корисного сигналу (команд управління) за наявності перешкод.

картографування, моніторингу та інших. Однак використання БПЛА обмежене тим, що керування польотом здійснюється в напіваавтоматичному по командам оператора, тому загальна точність польоту, залежить від його майстерності реагувати на зміну параметрів стану навколишнього середовища. Тому, використання оптимальної системи автоматичного керування (САК) яка дозволяє автоматично реагувати на зміни параметрів стану атмосфери і забезпечувати стабільний політ, є важливою задачею. Основним завданням такої системи є автоматизація процесу керування БПЛА, зменшення впливу людського фактору на процес керування дроном та забезпечення ефективного виконання поставлених завдань. У статті розглядається проблема системи керування БПЛА в умовах негативного впливу параметрів стану атмосфери, таких як вітер, турбулентність повітря, опади та інші. Досліджено можливості вдосконалення системи керування для підвищення точності польоту та керованості БПЛА в таких умовах. Зокрема, розглядаються сучасні методи оптимізації для задачі оптимального керування БПЛА з урахуванням багатьох факторів, таких як погодні умови, технічні характеристики дрона; та даних, що отримує зі своїх датчиків. Оптимальне керування БПЛА дозволяє забезпечити максимальну точність польоту,

мінімізувати ризик випадкових помилок та збільшити ефективність виконання поставлених завдань. Розглянуті методи оптимального керування відкривають нові можливості для використання БПЛА в більш широкому спектрі застосувань, включаючи зони зі складними погодними умовами, де раніше використання БПЛА було неможливим. Ключові слова: БПЛА, система автоматичного керування, оптимізація, математична модель, оптимальний лінійно-квадратичний регулятор. Застосування систем керування для задач робототехніки зростає на протязі останнього десятиліття, що пов'язано із стрімким розвитком мікропроцесорних контролерів, приладів та програмного забезпечення обчислювальної техніки для задач моделювання. Зараз найбільш популярними є – системи автоматичного керування, тобто управління процесами які досліджені і для них визначено заздалегідь відсутність подальшого втручання людини у процес керування. Технологічним об'єктом керування для таких систем є роботи маніпулятори, мобільні та інші. Ефективне виконання поставлених завдань для мобільних роботів, зокрема БПЛА, можливе лише за умови застосування систем автоматичного керування з використанням методів оптимізації, оскільки для них задача керування є особливо складною через багатовимірність системи, нестійкість до збурень, шумів та зміни динамічних параметрів. Враховуючи високу актуальність застосування БПЛА у різних галузях, важливо розвивати та досліджувати оптимальні системи автоматичного керування.

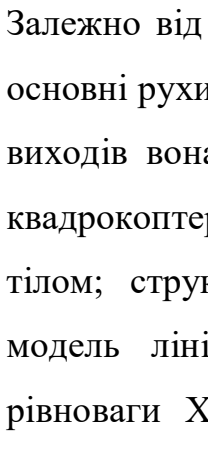
Для синтезу системи оптимального керування розглянемо особливості управління дронами і загальні вимоги до керованого польоту. Рух дрону в просторі визначається початковими умовами і діючими на апарат силами. В межах атмосфери на апарат діють сила тяги, аеродинамічні сили і сила тяжіння. При дії на дрон зазначених сил його рух безперервно збурюється, а параметри польоту відхиляються від програмних (розрахункових). Для отримання заданого руху дрону необхідно управляти діючими на нього силами. Будь-яка з сил, що діють на дрон, може бути використана для управління рухом. При створенні систем управління до керуючих сил

ставляться такі вимоги: 1. Широкий діапазон зміни за величиною і напрямком; 2. Простота реалізації керуючих органів; 3. Малі витрати енергії на управління; 4. Малий вплив керуючих органів на аеродинамічний опір. Всі збурення, що діють на систему «дронсистема управління», можна розділити на корисні, які система повинна відтворювати без спотворень, і шкідливі, на які система повинна слабо реагувати. При цьому як корисні, так і шкідливі збурення можуть бути детермінованими і випадковими. При управлінні рухом дрона повинні бути досягнуті: задана якість перехідного процесу; точність виконання команд; слабка реакція на зовнішні збурення; оптимальність руху (мінімальні витрати, мінімізація часу польоту, максимальна дальність і т. д.); безпеку польоту. Мета процесу польоту за визначеним маршрутом полягає в чіткому позиціонуванні БПЛА в просторі і мінімальне відхилення від заданої траєкторії, тобто позиціонування по просторовим координатам x , y , z та повороту дрона ϑ , φ , ψ . Ці параметри керуються шляхом комбінованої зміни швидкостей окремих моторів. (Мал.1). Для процесу управління польотом дрона по заданій траєкторії, до керуючих впливів доцільно віднести зміну швидкості обертання двигунів $u_1 \dots u_4$. До контрольованих збурень доцільно віднести вагу дрону f_2 і додаткове збурення, що виникає при шумі сигналів керування f_1 . Всі інші вхідні дії (флуктуації параметрів стану атмосфери, збурення датчиків положення, тощо), віднесемо до неконтрольованих збурень. Тоді структурнопараметрична схема БПЛА (квадрокоптеру), відповідно до описаних факторів:



Мал.1

Ньютона вважається чинним. Глобальну систему позначимо ONED, напрямки спрямовані на Північ (North), Схід (East) та Вниз (Down). Локальна система OABC – початок якої знаходиться у центрі мас дрона (Aircraft Body Center), а осі напрямлені по напрямку переднього та правого двигунів, і перпендикулярно вниз до площини в якій знаходяться всі двигуни. Рух дрону у глобальних координатах можна розділити на дві частини: рух центру мас та рух навколо центру мас. Для опису будь-якого руху простору в часі потрібно шість ступенів свободи. Це три зміни позиції і три кутові рухів, а саме: три переміщення та три рухи обертання вздовж трьох осей. Контроль шести ступенів свободи рухів можна реалізувати, регулюючи швидкість обертання різних двигунів. Рух квадрокоптеру може бути реалізований за допомогою реактивного моменту, який виробляє мотор. Коли чотири швидкості ротора мають однакові реактивні моменти, вони врівноважують один одного, якщо чотири швидкості ротора не абсолютно однакові, реактивні моменти будуть не збалансований, і дрон почне обертатися. Коли чотири ротора швидкості синхронно збільшуються і зменшуються це сприяє вертикальному руху.

Залежно від швидкості обертання кожного мотору можна визначити чотири основні рухи дрону, які показані на . Оскільки схема має чотири входи та шість виходів вона вважається нелінійною складною системою, тому для моделі квадрокоптеру введемо наступні припущення: квадрокоптер є жорстким тілом; структура симетрична; екранний ефект ігнорується. Математична модель лінійного виду, отримана шляхом лінеаризації навколо точки рівноваги X і заданого (фіксованого) вектору керування u виконано на спрощеній моделі квадрокоптера, з апроксимованими функціями синусів та косинусів для пришвидшення розрахунків, проте така модель справедлива для невеликих приростах кутів повороту БПЛА на малих проміжках часу:

$$\begin{cases} \dot{\phi} \approx p + r\theta + q\phi\theta \\ \dot{\theta} \approx q - r\phi \\ \dot{\psi} \approx r + q\phi \\ \dot{p} \approx \frac{I_y - I_x}{I_x} r q + \frac{I_x + I_{wx}}{I_x} \\ \dot{q} \approx \frac{I_x - I_x}{I_y} p r + \frac{I_y + I_{wy}}{I_y} \\ \dot{r} \approx \frac{I_x - I_y}{I_x} p q + \frac{I_x + I_{wx}}{I_x} \\ \dot{u} \approx r v - q w - g\theta + \frac{I_{wx}}{m} \\ \dot{v} \approx p w - r u + g\phi + \frac{I_{wy}}{m} \\ \dot{w} \approx q u - p v + g + \frac{I_{wx} - I_x}{m} \\ \dot{x} \approx w(\phi\psi + \theta) - v(\psi - \phi\theta) + u \\ \dot{y} \approx v(1 + \phi\psi\theta) - w(\phi - \psi\theta) + u\psi \\ \dot{z} \approx w - u\theta + v\phi \end{cases}$$

ВИСНОВКИ. У частині роботи досліджено основні аспекти оптимального керування квадрокоптером в умовах неконтрольованих збурень, при зміні параметрів стану атмосфери. Отримані результати демонструють, що траєкторія польоту досить точно відповідає заданій траєкторії, при цьому функціонал майже завжди має сходження.

На сьогоднішній день безпілотні літальні апарати (БПЛА) широко застосовуються у різних сферах господарства та є перспективним напрямком розвитку для багатьох країн. Одним з ключових аспектів у розробці кожного нового БПЛА є система навігації і орієнтації, яка є найскладнішою та вимагає

особливої уваги. Виклик полягає в створенні ефективної системи, яка б за мінімальних витрат містила оптимальний набір датчиків для автономного польоту та забезпечувала високу точність. Розробка такої системи відкриє шлях до створення конкурентоздатних БПЛА. Результати досліджень можуть також сприяти у вдосконаленні існуючих систем навігації і орієнтації і методів управління БПЛА на основі GPS позиціонування та інтелектуальних методів управління. Огляд відомих методів та рішень Управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА) включає в себе різноманітні методи та алгоритми, спрямовані на забезпечення стабільності, точності керування, зменшення ризику втрати зв'язку та забезпечення безпеки польоту. У цьому контексті відрізняють три основних режими управління різнорідними робототехнічними комплексами (РТК): ручний, напівавтоматичний та автоматичний.

Стасенко Д. В. наголосив, що у складі системи управління ключовим елементом є навігаційна система, яка формує основу для автоматичного керування та налаштування автопілоту на певні режими польоту. Навігаційна система БПЛА включає наступні основні компоненти:— Інерціальний модуль: Використовуються гіроскопи та акселерометри для вимірювання змін у прискоренні та кутовій швидкості, що дозволяє визначити положення та орієнтацію БПЛА.—Компаси: Визначають орієнтацію БПЛА відносно магнітного поля Землі, що необхідно для визначення напрямку польоту та корекції навігаційних даних.—GPS-приймачі: Забезпечують глобальне позиціонування та визначають місцеположення та швидкість БПЛА за допомогою сигналів від супутників. GPS-приймачі є ключовим компонентом навігаційної системи БПЛА. Bustos A. P. припустив, що GPS є одним із найважливіших елементів управління БПЛА, оскільки він дозволяє визначати точне місцезнаходження апарату в реальному часі і використовується для автономного контролю, пілотажу та керування польотом, забезпечуючи стабільну траєкторію польоту. Березіна С. І. констатувала, що система GPS працює на основі принципу трилатерації, що

передбачає отримання сигналів від трьох або більше супутників для визначення місцезнаходження об'єкта. Hart S. узагальнив дані та зробив висновок про те, що БПЛА отримує сигнали від супутників, які перебувають на орбіті, і використовує часову різницю між сигналами для визначення свого місцезнаходження. Для точного позиціонування БПЛА за допомогою GPS необхідно використовувати більше ніж чотири супутники, щоб забезпечити точність інформації про місцезнаходження та швидкість в реальному часі. Іваненко Ю. В. акцентував увагу на тому, що GPS дозволяє БПЛА автоматично виконувати маршрути, визначати висоту польоту, коригувати своє положення діяти у випадку непередбачуваних обставин. Використання GPS також важливо для забезпечення безпеки польоту, дозволяючи БПЛА повертатися до базової точки або приймати інші заходи в разі потреби. У навігаційній системі БПЛА найчастіше використовується формат запису координат у градусах та десяткових градусах (DD), що дозволяє точно визначати місцезнаходження об'єкта. Jiang G узагальнюючи наголосив, що GPS є важливою складовою навігаційної системи БПЛА, яка дозволяє точно визначати місцезнаходження та швидкість, необхідні для виконання різних завдань. Додатково до GPS можуть використовуватися інші навігаційні системи та сенсори для покращення точності визначення місцезнаходження та швидкості БПЛА. GPS-позиціонування є ключовим для автоматичного керування польотом БПЛА, забезпечуючи можливість підтримки заданої траєкторії та виконання різноманітних завдань, таких як моніторинг або доставка вантажу. Ця технологія може застосовуватися як для автономного, так і для дистанційного керування (Guo X.) Ivanov D. встановив те, що у режимі автономного керування, GPS-дані дозволяють визначити траєкторію польоту та точку приземлення, в той час як у дистанційному керуванні, вони використовуються для передачі реального часу позиції БПЛА та керування польотом здалеку. GPS-позиціонування важливе для забезпечення точного позиціонування та безпечного керування польотом, зменшуючи ризик

непередбачуваних ситуацій під час польоту. Без навігаційної системи БПЛА не може виконувати свої завдання в автономному режимі або безпечно повертатися до бази після завершення польоту. Milyakov D. A. Констатував, що інтелектуальне керування–методи управління, які використовують різні підходи штучного інтелекту, такі як штучні нейронні мережі, нечітка логіка, машинне навчання, еволюційні обчислення і генетичні алгоритми. Інтелектуальні польотні режими БПЛА представляють собою програмні алгоритми та функції, що дозволяють автономно виконувати різні завдання, такі як автоматичний пілотаж, навігація, виконання зйомок з повітря, виявлення та слідкування за об'єктами, аналіз отриманих зображень та даних і так далі. Розрізняють такі рівні інтелектуального управління БПЛА:–Рівень 0:Робастне керування зі зворотним зв'язком–Рівень 1. Адаптивне управління–рівень 0 + адаптивні керуючі параметри–Рівень 2. Оптимальне управління–рівень 1 + мінімізація або максимізація функції якості–Рівень 3. Планове управління–рівень 2 + здатність планувати заздалегідь не певні ситуації, імітувати і моделювати невизначеності 3. 1. Адаптивне керування Oliveira M. T. представляє різні типи систем автоматичного керування із використанням нейронних мереж як адаптивного модуля системи. Розглянуті проблеми, які виникають із використанням нейронних регуляторів, зокрема, проблема ініціалізації вагових коефіцієнтів мережі. Також окреслені проблеми, які виникають при навчанні нейронних мереж. Особливістю приведених систем є їх робастність, проте, жодна з наведених систем автоматичного управління не здатна із заданою точністю витримувати обрані значення параметрів за умов невідомих збурень. В статті Rosas-Cervantes A. досліджуються стабільність і збіжність нейронної мережі відповідно до типу навчання мережі в системі автоматичного керування. Інтелектуальна система управління польотом використовує прямий адаптивний та динамічний інверсійний підхід управління. Результати льотних випробувань відзначають потреби в подальших дослідженнях з метою поглиблення розуміння ефективності та

обмежень прямого адаптивного управління польотом. Akhloufi M. A. також запропонована гібридна адаптивна архітектура управління. Гібридне адаптивне управління поєднує як прямі, так і непрямі методи

Адаптивного управління для забезпечення більш ефективної стратегії управління. Непряме адаптивне управління відповідає за оновлення динамічного контролера інверсії з більш точної моделі, який оцінюється за методом найменших квадратів. Будь-які залишкові помилки потім будуть оброблені нейронною мережею прямого адаптивного управління. Перевагою гібридного методу адаптивного управління є можливість оцінити параметри моделі в режимі «он-лайн» та найкращим чином адаптувати нові параметри системи до зовнішніх збурень. В той же час, задача гарантованого витримування заданих параметрів системи при невідомих збуреннях не розглянута. Pereira D.S. проаналізовано задачі синтезу оптимальної системи керування літальним апаратом за умови випадкових зовнішніх збурень. Автором приведено використання методів динамічного програмування для вирішення задачі оптимального керування, розглянуті методи фільтрації, зокрема, фільтри Калмана-Бьюсі, Віннера, приведено приклад стохастичної оптимальної системи. Фільтр Віннера має обмеження на спостереження, оскільки спостереження мають відбуватися на безкінечному відрізку часу. Недоліком стохастичної оптимальної системи є необхідність апріорної інформації щодо типу збурень, так, для гарантування синтезу оптимальної стохастичної системи, шум має підпорядковуватись нормальному розподілу. Задача витримки заданих параметрів системою не розглядається. Так, в роботі Telli K розроблені алгоритми оптимального управління БПЛА. Вирішується завдання мінімізації витрат на управління і максимальної швидкодії для моделі БПЛА як твердого тіла, яке описується рівняннями високого порядку (Ейлера і Пуассона). В роботі враховується обмеження на вектор управління, які існують в реальних БПЛА. Перевагою даного підходу є формування управління при різних значеннях початкового і кінцевого векторів стану без зміни структури алгоритму управління,

скорочений обсяг обчислювальних витрат до 20 разів при формуванні траєкторії в реальному часі. Суттєвим недоліком цієї роботи є відсутність даних про реакцію системи на вплив шумів і зовнішніх сил. Задача витримки параметрів системи із гарантованою точністю при дії невідомих збурень не була розглянута. Оптимальне керування на основі моделі інтелектуального управління включає в себе он-лайн розрахунки оптимізації. Для здійснення задачі оптимізації модель враховує динаміку системи, обмеження і цілі контролю. Такий підхід може бути використаний при створенні системи автоматичного керування гарантованої точності. Стандартні режими польоту призначені для забезпечення безпечного та ефективного пілотування БПЛА з меншим ризиком помилки. Це такі режими, як Beginner Mode, Positioning Mode, Attitude Mode та Sport Mode. Наприклад, Beginner Mode призначений для новачків, маючи обмежені можливості, щоб забезпечити просте та безпечне керування. Невлюдов І. Ш. у режимі позиціонування (Positioning Mode) БПЛА використовує GPS або інші супутникові системи для точного визначення своєї позиції у просторі [4]. Цей режим дозволяє БПЛА автоматично утримувати задану позицію, користуючись сигналами з супутників. Така можливість забезпечує стабільність польоту та точність місцезнаходження, що особливо важливо при виконанні завдань, таких як зйомка відео чи точне маневрування. У режимі орієнтації (Attitude Mode), керування БПЛА здійснюється за допомогою гіроскопів та акселерометрів, а не GPS. Це дозволяє оператору контролювати орієнтацію БПЛА, включаючи кут крену, тангажу та курс. Режим орієнтації надає більшу свободу управління БПЛА, що дозволяє виконувати складні маневри та керувати політними характеристиками.

Sport Mode призначений для швидкого польоту та має більшу маневреність. У цьому режимі БПЛА може рухатись з високою швидкістю та виконувати стрімкі повороти. Sport Mode зазвичай вимагає більшого досвіду управління БПЛА через його високу швидкість та маневреність. Щодо

комплексу інтелектуальних режимів, наявних у БПЛА, варто зазначити додаткові можливості. На різних моделях може бути доступний різний набір таких режимів, які дозволяють БПЛА працювати в автономному або напіваавтоматичному режимі. Це дозволяє операторові зосередитися на виконанні завдань, таких як моніторинг або зйомка. Berezhnyi А. Наголосив, що існує безліч інтелектуальних режимів управління БПЛА, які забезпечують автоматизоване керування та навігацію. Наприклад, Кінематографічний режим (Cinematic Mode) поєднує в собі найкращі можливості режимів позиціонування та орієнтації для створення плавних кадрів. Режим TapFly дозволяє спрямовувати БПЛА у політ одним дотиком на мобільному пристрої, обходячи перешкоди автоматично. Режим Active Track є одним з найпопулярніших та часто використовуваних інтелектуальних режимів польоту для БПЛА. Використовуючи модуль GPS та камеру, БПЛА може автоматично відстежувати об'єкти, які цікавлять оператора, включаючи людей, тварин або транспортні засоби. Цей режим дозволяє БПЛА автоматично слідкувати за обраними об'єктами після отримання відповідної команди. Режим відстеження має три варіанти: Trace, Profile і Spotlight, які визначають позицію безпілота щодо об'єкта відстеження. Режим QuickShot призначений для швидкого та зручного створення фотографій і відеокліпів. У своїх чотирьох підрежимах він дозволяє легко вибрати об'єкт для зйомки, натискаючи на нього на екрані або малюючи рамку навколо нього. Наприклад, популярним підрежимом є Dronie, де БПЛА летить угору і назад, тримаючи фокус на об'єкті.

Tripod зручний для аерозйомки з низької відстані. У цьому режимі швидкість руху БПЛА знижується, дозволяючи оператору здійснювати дуже точні рухи та зберігати стабільне положення безпілота. Однак ефективність роботи цього режиму значно залежить від наявності та якості сигналу GPS. Режим Draw дозволяє користувачеві вказати маршрут переміщення БПЛА, намальований на екрані мобільного пристрою. Швидкість руху може бути налаштована за допомогою повзунків у меню на

дисплеї. Massé С. узагальнив дані і висловив припущення, що у режимі Waypoints також можна встановлювати траєкторію польоту БПЛА, але в цьому випадку потрібно лише відзначити точки маршруту, які цікавлять. Безпілотник буде рухатися, орієнтуючись на ці точки. Це корисно, якщо в цих точках БПЛА потрібно виконати різні завдання, наприклад, зняти матеріал або провести інспекцію об'єкта. Цей режим є ефективним, оскільки БПЛА може гнучко вибрати найбільш раціональний маршрут переміщення від однієї точки до іншої. Також збільшується точність польоту, оскільки точки встановлюються з використанням координат. Крім того, ПЗу БПЛА зберігає дані точок для повторення маршруту. Режим стеження за рельєфом (Terrain Follow Mode) доступний тільки у БПЛА з оптичними сенсорами, які спрямовані вниз. До них належать такі моделі, як Phantom 4 Pro і Mavic, а також деякі промислові та сільськогосподарські безпілотники. У цьому режимі БПЛА може підтримувати постійну висоту над землею навіть під час підйому на гору з ухилом до 20 градусів. Різницю висот можна налаштувати від 1 до 10 метрів, але ця функція не активується, якщо БПЛА перетинає місцевість зі схилом вниз. Spotlight Pro є покращеною версією підрежиму Spotlight ActiveTrack, що пропонує більше функціональності. Цей режим дозволяє БПЛА літати в автономному режимі, в той час як камера продовжує відстежувати обраний об'єкт. У Spotlight Pro також доступний підрежим Composition Mode, що дозволяє користувачу обрати область на екрані для відстеження об'єкта. Камера розпочне відстеження лише тоді, коли об'єкт перетне вказані межі та увійде в окреслену область. Фіксація курсу (Course Lock) дозволяє БПЛА летіти у певному напрямку, обмежуючи маневреність і забезпечуючи літальному апарату певний «коридор» руху туди і назад. Ця функція не обмежує контроль над підвісом і камерою, тому якість зйомки не постраждає. Вона корисна для польотних завдань вздовж визначеного маршруту, де відхилення від нього може вплинути на досягнення основних цілей. Режим «Точки інтересу» (Points of Interest) подібний до режиму кругової зйомки. У цьому режимі БПЛА облітає

обраний об'єкт по колу, зберігаючи фокус камери на ньому. Можливо відрегулювати швидкість, висоту і радіус польоту. Під час руху за заданим шаблоном пілот може призупинити рух БПЛА, не змінюючи фокус камери на об'єкті. Khan M. Наголосив, що в багатьох сучасних безпілотних системах БПЛА можуть автоматично приймати рішення з управління, використовуючи вбудовані алгоритми та сенсори для навігації, збору даних та уникнення перешкод[13]. Оператор може задати конкретний маршрут або регіон для руху БПЛА, і він автоматично пролітає цю траєкторію. Кожен інтелектуальний режим керування має свої переваги та обмеження, які оператор повинен враховувати. Порівняння способів навігації БПЛАВ даний час, для переміщення БПЛА в просторі, все частіше використовують системи, що створюють карту в процесі руху, застосовуються алгоритми одночасної навігації та картографування (map-building simultaneous localization and mapping –SLAM). SLAM (одночасна локалізація та картографування – одночасна локалізація та побудова карти) в даний час є новим напрямком розвитку для вчених. Метод SLAM використовує мобільні незалежні інструменти для побудови карти у відомому просторі з одночасним контролем поточної позиції та пройденої відстані. Розробка SLAM сприяла орієнтації БПЛА як на наземні, так і на безпілотні пристрої. Існує дві великі групи Slam алгоритмів-SLAM frontend і Slam backend. Slam frontend вирішує наступні завдання. 1. Аналізу та інтеграції нових даних (data association). На цьому етапі проводиться виділення особливостей (Feature / landmarks extraction) на знову отриманих даних. Особливості-Це такі характеристики, які легко можуть бути виділені в середовищі і використовуватися в подальшому для орієнтації в просторі. 2. Обчислення зсуву (Local Motion Estimation). Зсув положення виділених особливостей на сцені можна визначити, зіставивши набір особливостей, отриманих на поточному кроці, з набором особливостей, отриманих на попередньому кроці. Так як особливості самі по собі стаціонарні, очевидно, що цей зсув – результат зміни положення камери (робота). На основі цієї інформації можна

виразити координати камери через систему лінійних рівнянь.3.Оновлення структури (Features Integration), що зберігає історію переміщень, де кожен стан являє собою глобальне положення робота і взаємне розташування досліджуваних особливостей на певному проміжку часу. На цьому етапі проводиться аналіз, і отримані раніше дані додаються в загальну структуру для зберігання інформації про світ за весь час дослідження.На основі аналізу різних способів оптичної навігації можна скласти порівняльну таблицю і виділити переваги і недоліки кожного способу. В таб. 1 наведено порівняння основних методів, що застосовуються сьогодні для вирішення завдань оптичної навігації БПЛА та GPS навігації. Тут показані переваги «+»і недоліки «-»розглянутих способів навігації.

Таблиця 1

Порівняння способів навігації БПЛА						
Спосіб навігації	Характеристики способів навігації					
	Розмір території не обмежений	Висока точність на коротких траєкторіях	Інваріантна до змін в середовищі	Не накопичує помилку	Не потребує стаціонарних об'єктів	Робота в умовах з високим вмістом перешкод
GPS	+	-	+	+	+	-
SLAM	-	+/-	-	+	-	+
КЕНС	-	+	-	+	+	+
Візуальна одометрія	+	+	+	-	+	+

Метод візуальної одометрії не залежить від радіоперешкод, має високу точність, не залежить від розташування додаткових стаціонарних об'єктів але має і недоліки пов'язані з накопичення помилки в ході роботи методу. Проблема накопичення помилки вирішена в деяких алгоритмах SLAM.

Табл. 1.–Архітектура нейронної мережі для визначення положення в просторі за зображенням відео камери Основне завдання SLAM-синхронне визначення місця розташування і складання карти. Вона пов'язана з побудовою карти невідомого простору БПЛА під час навігації по споруджуваній карті. Проблема одночасної локалізації та побудови карти є фундаментальним завданням при створенні автономних БПЛА, і алгоритм SLAM в цьому випадку є базовим методом для багатьох навігаційних систем.

Висновки частини

Встановлено, що використання інтелектуальних польотних режимів значно підвищує продуктивність та ефективність безпілотних систем, зменшує навантаження на пілота та ризики, пов'язані з людським чинником. Інтелектуальні методи керування є важливою складовою розвитку сучасних безпілотних систем, що дозволяють ефективно керувати БПЛА та виконувати різноманітні завдання автоматично. У такому контексті безпілотні літальні апарати можуть бути використані для збору інформації з висоти, що дозволяє охопити велику площу землі одночасно. Це дозволяє виявляти вогонь на великих територіях, таких як лісові масиви, де швидке виявлення вогню є критично важливим.

5 Розрахункова частина

На початковому етапі розрахункової частини було обрано математичну модель руху БПЛА як твердого тіла у просторі. Модель базується на рівняннях поступального та обертального руху з урахуванням аеродинамічних сил і моментів. Для спрощення розрахунків і забезпечення можливості чисельного моделювання використано лінеаризовану модель у просторі станів, яка адекватно описує динаміку апарата в околі робочої точки.

На основі обраної математичної моделі було сформовано багатоконтурну систему керування, яка включає контури стабілізації кутів тангажа, крену та курсу, а також зовнішні контури керування положенням і швидкістю. Для кожного контуру використано класичні PID-регулятори, параметри яких підібрані за критеріями швидкодії, стійкості та мінімізації перерегулювання.

У розрахунковій частині реалізовано алгоритм наведення БПЛА на задану траєкторію, що базується на методі прямої видимості (LOS). Траєкторія руху задається у вигляді послідовності маршрутних точок, між якими система керування формує плавний перехід. Розрахунки включають визначення необхідних кутів курсу та швидкості для забезпечення мінімального відхилення від траєкторії.

Для визначення поточного положення, швидкості та орієнтації БПЛА використано алгоритм сенсорного злиття даних на основі фільтра Калмана. У розрахунках враховано похибки GPS та інерціальних датчиків. Це дозволило оцінити вплив шумів вимірювань на точність навігації та стабільність системи керування.

У розрахунковій моделі введено зовнішні збурення у вигляді вітрових навантажень та випадкових збурюючих сил. Проведені розрахунки показали вплив вітру на поперечну похибку траєкторії та дозволили оцінити запас стійкості системи керування в умовах реальної експлуатації.

Автоматика комп'ютеризовані системи управління				Пояснювальна записка					
Виконавець	Рижков О.О.			Розділ 5 Розрахункова частина		Сторінок	Сторінка		
Керівник	Кривоносенко О.П.				25	13	36	87	55
Нормконтро	Дивнич М. П.				М 174 24 СУ				
Охорона п.	Вальченко О.І								
Охорона н.с.	Дмитруха Т.І.								

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
from numpy.linalg import solve
import os

np.random.seed(42)

# Simulation parameters (reduced for speed)
dt = 0.01
T = 20.0          # seconds per trial
steps = int(T/dt)
N = 30           # Monte-Carlo trials (reduced from 100)

# Vehicle / controller parameters
V0 = 12.0        # m/s nominal speed

Kp = 1.2
Ki = 0.0
Kd = 0.2
k_los = 2.0

max_omega = np.deg2rad(60) # rad/s

# Sensor noise
sigma_gps = 1.5    # m
sigma_gyro = 0.01 # rad/s

# EKF noise matrices
Q = np.diag([0.01,0.01,0.001,0.0005,1e-6,1e-6])
R_gps = np.diag([sigma_gps**2, sigma_gps**2])

# Reference path: straight line along x-axis (y_ref = 0), goal far ahead

```

```

x_ref_goal = 1000.0
y_ref_goal = 0.0

def wrap(a):
    return np.arctan2(np.sin(a), np.cos(a))

class PID:
    def __init__(self, Kp, Ki, Kd, dt):
        self.Kp, self.Ki, self.Kd = Kp, Ki, Kd
        self.dt = dt
        self.I = 0.0
        self.prev = 0.0
    def step(self, err):
        self.I += err*self.dt
        D = (err - self.prev)/self.dt
        self.prev = err
        return self.Kp*err + self.Ki*self.I + self.Kd*D

rms_cross_list = []
max_cross_list = []
rms_pos_list = []

rep_traj = None
rep_est = None

gps_interval = int(1/(dt*5)) # GPS 5 Hz

for trial in range(N):
    state = np.array([0.0, 0.0, v0, 0.0])
    x_est = np.array([0.0, 0.0, v0, 0.0, 0.0, 0.0])
    P = np.eye(6)*0.1

    pid = PID(Kp, Ki, Kd, dt)

```

```

traj = np.zeros((steps,4))
est_traj = np.zeros((steps,6))
cross_errors = np.zeros(steps)
pos_errors = np.zeros(steps)

wind_x = np.random.randn()*0.5
wind_y = np.random.randn()*0.5

for k in range(steps):
    x,y,V,psi = state
    e_perp = y - 0.0
    psi_line = np.arctan2(y_ref_goal - y, x_ref_goal - x)
    psi_cmd = psi_line + np.arctan2(k_los * e_perp, V)
    err = wrap(psi_cmd - psi)
    omega_cmd = pid.step(err)
    omega_cmd = np.clip(omega_cmd, -max_omega, max_omega)
    a_cmd = 0.0

# True dynamics

```

```

dx = V*np.cos(psi) + wind_x
dy = V*np.sin(psi) + wind_y
dV = a_cmd
dpsi = omega_cmd
state = state + dt * np.array([dx, dy, dV, dpsi])

# Sensors
gps_meas = None
if k % gps_interval == 0:
    gps_meas = np.array([state[0] + np.random.randn()*sigma_gps,
                        state[1] + np.random.randn()*sigma_gps])

# EKF predict
psi_e = x_est[3]
x_est[0] += x_est[2]*np.cos(psi_e)*dt
x_est[1] += x_est[2]*np.sin(psi_e)*dt
x_est[2] += a_cmd*dt
x_est[3] += (omega_cmd + x_est[5])*dt
F = np.eye(6)
F[0,2] = np.cos(psi_e)*dt
F[0,3] = -x_est[2]*np.sin(psi_e)*dt
F[1,2] = np.sin(psi_e)*dt
F[1,3] = x_est[2]*np.cos(psi_e)*dt
F[3,5] = dt
P = F.dot(P).dot(F.T) + Q

if gps_meas is not None:
    H = np.zeros((2,6)); H[0,0]=1; H[1,1]=1
    y_innov = gps_meas - H.dot(x_est)
    S = H.dot(P).dot(H.T) + R_gps
    Kk = P.dot(H.T).dot(solve(S, np.eye(2)))
    x_est = x_est + Kk.dot(y_innov)
    P = (np.eye(6) - Kk.dot(H)).dot(P)

```

```

    traj[k,:] = state
    est_traj[k,:] = x_est
    cross_errors[k] = abs(state[1] - 0.0)
    pos_errors[k] = np.sqrt((state[0]-x_est[0])**2 + (state[1]-x_est[1])

rms_cross = np.sqrt(np.mean(cross_errors**2))
max_cross = np.max(cross_errors)
rms_pos = np.sqrt(np.mean(pos_errors**2))

rms_cross_list.append(rms_cross)
max_cross_list.append(max_cross)
rms_pos_list.append(rms_pos)

if rep_traj is None:
    rep_traj = traj.copy()
    rep_est = est_traj.copy()
df = pd.DataFrame({
    'rms_cross': rms_cross_list,
    'max_cross': max_cross_list,
    'rms_pos_error': rms_pos_list
})
summary = df.describe().loc[['mean','std','50%','min','max']]

# Save plots
plt.figure()
plt.plot(rep_traj[:,0], rep_traj[:,1])
plt.plot(rep_est[:,0], rep_est[:,1])
plt.xlabel('x (m)')
plt.ylabel('y (m)')
plt.title('Representative trajectory (true vs EKF estimate)')
plt.grid(True)
traj_plot_path = 'trajectory_sample.png'
plt.savefig(traj_plot_path)

```

```

plt.close()

plt.figure()
plt.hist(df['rms_cross'], bins=12)
plt.xlabel('RMS cross-track error (m)')
plt.ylabel('Count')
plt.title('Histogram of RMS cross-track error')
plt.grid(True)
hist_plot_path = 'hist_rms_cross.png'
plt.savefig(hist_plot_path)
plt.close()

csv_path = 'monte_carlo_results.csv'
df.to_csv(csv_path, index=False)

outputs = {
    'trials': N,
    'time_per_trial_s': T,
    'summary_stats': summary,
    'sample_trajectory_image': traj_plot_path,
    'histogram_image': hist_plot_path,
    'csv_results': csv_path
}
outputs

```

5. 1Результат розрахункової частини

```
{'trials': 30,  
  'time_per_trial_s': 20.0,  
  'summary_stats':      rms_cross   max_cross   rms_pos_error  
mean  106.083678  201.153514      1.221086  
std    9.597435   13.374042      0.094990  
50%   108.357258  204.127644      1.192034  
min    81.392789  167.299721      1.057111  
max   123.182200  225.931353      1.397712,  
  'sample_trajectory_image': 'trajectory_sample.png',  
  'histogram_image': 'hist_rms_cross.png',  
  'csv_results': 'monte_carlo_results.csv'}
```

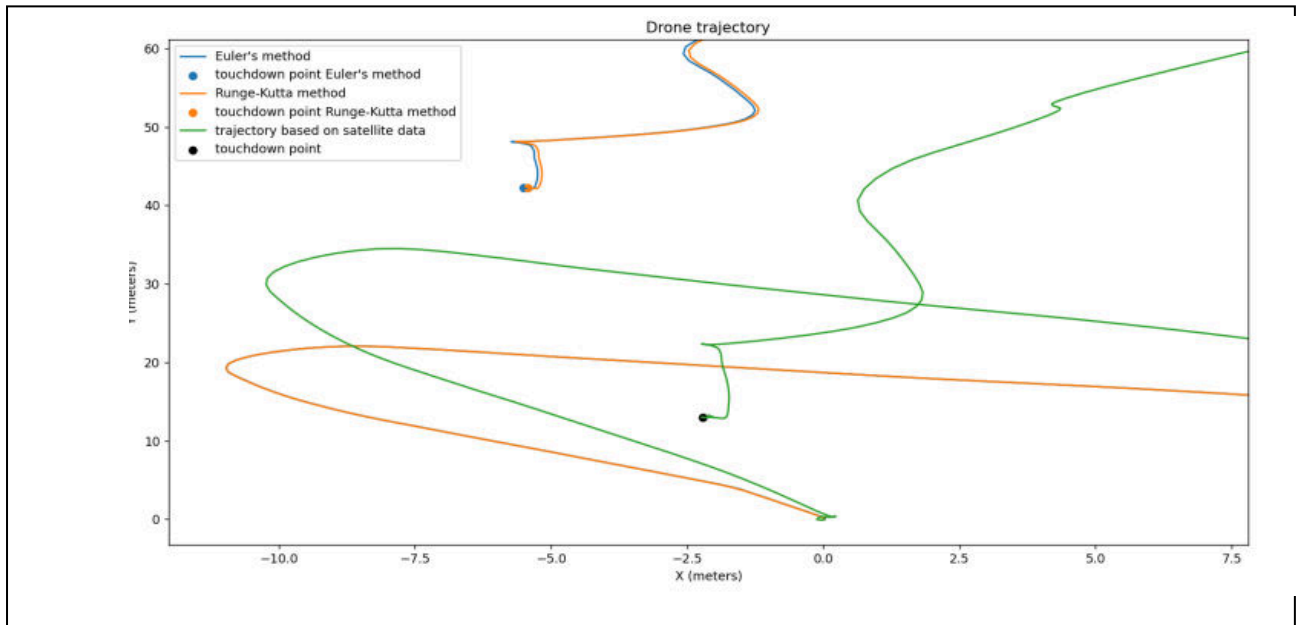
Виведення даних польоту дрона

```
latitude = data1 [ ' latitude ' ] . to_numpy ( )  
longitude = data1 [ ' longitude ' ] . to_numpy ( )  
time = data1 [ ' time ( millisecond ) ' ] . to_numpy ( )  
del ta_t = ( time [ 1 : ] = time [ : =1 ] )  
del ta_t = del ta_t [ : : =1 ]  
del ta_t = np . insert ( delta_t , 0 , 100 )  
# speed in meters per millisecond  
x_speed = data1 [ ' _ xSpeed (mph) ' ] . to_numpy ( ) *  
* 1609.344/3600000  
y_speed = data1 [ ' _ ySpeed (mph) ' ] . to_numpy ( ) *  
* 1609.344/3600000  
# distance in meters  
xDistance = np . cumsum ( x_speed * del ta_t )  
yDistance = np . cumsum ( y_speed * del ta_t )  
# Euler ' s method  
xE = np . insert ( xDistance , 0 , 0 )  
yE = np . insert ( yDistance , 0 , 0 )  
# Runge=Kutta method
```

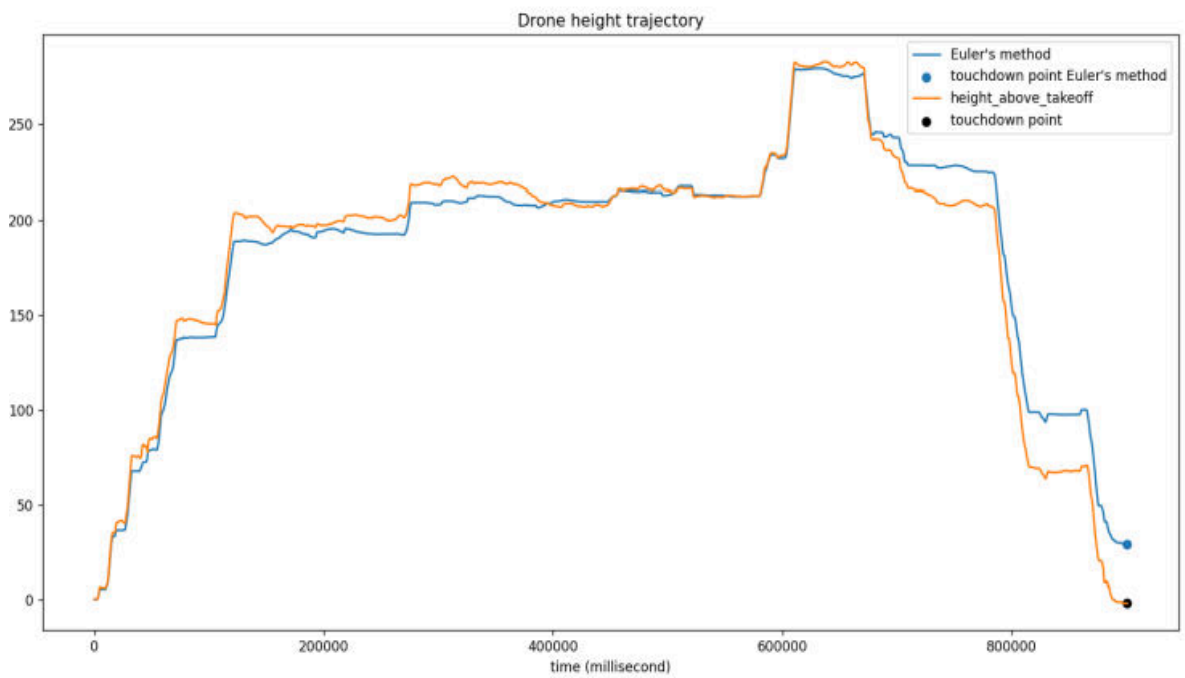
```

xRK = arr.array('f', ())
yRK = arr.array('f', ())
x_0 = 0
y_0 = 0
for i in range(0, int(len(xDistance) - 1)):
    xRK.append(x_0)
    yRK.append(y_0)
    x_0 = x_0 + 0.5 * (x_speed[i+1] + x_speed[i]) *
    * delta_t[i]
    y_0 = y_0 + 0.5 * (y_speed[i+1] + y_speed[i]) *
    * delta_t[i]
print("accuracy in metres (Euler's method): ",
math.sqrt((x[=1] - xE[=1])**2 +
(y[=1] - yE[=1])**2))
print("accuracy in metres (Runge-Kutta method): ",
math.sqrt((x[=1] - xRK[=1])**2 +
(y[=1] - yRK[=1])**2))
print("landing point: ", xRK[=1], yRK[=1], y2[=1])

```

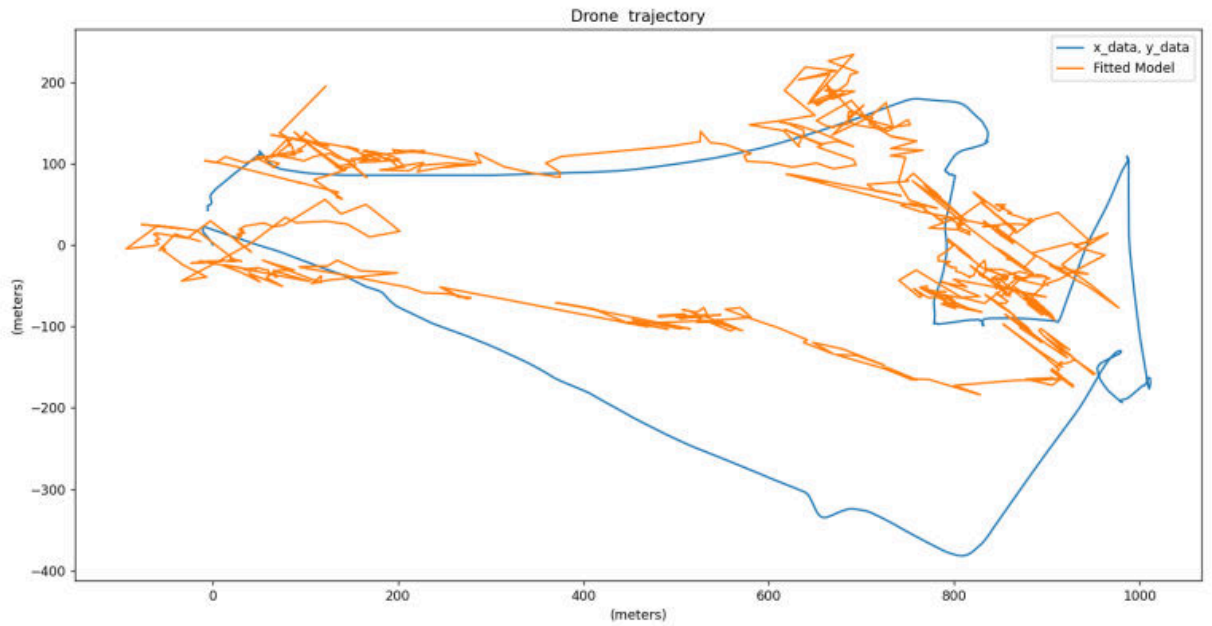


Мал.2

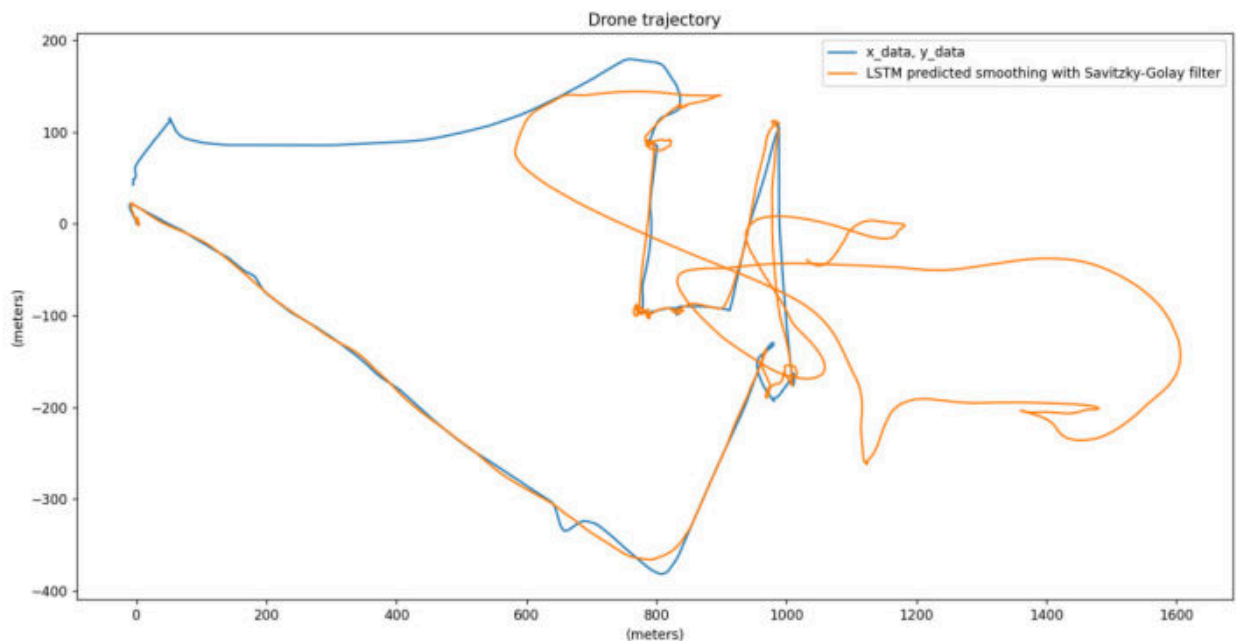


Мал.3

Малюнок 2 та 3 відповідності між реальною траєкторією та прорахованою траєкторією. Навчання відбувалося на показниках координат відносно точки зльоту дрона. Коефіцієнти були оптимізовані за допомогою алгоритму методу градієнтного спуску.



Мал.4



Мал.5

Малюнок 4 та 5 відповідності між реальною траєкторією та траєкторією, прорахованою за допомогою LSTM. Навчання відбувалося на показниках координат відносно точки зльоту дрона, що були прораховані на основі усереднених даних з пульта управління. Крива була згладжена за допомогою фільтру Савіцького-Голя.

6 Вплив штучного інтелекту на управління БПЛА

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у цивільній, науковій та оборонній сферах зумовив зростання вимог до точності, автономності та надійності їхніх систем керування. Традиційні підходи до керування польотом, засновані на класичних методах автоматичного керування, демонструють високу ефективність лише за умови точного знання математичної моделі апарата та обмежених зовнішніх збурень. У реальних умовах польоту БПЛА стикаються з невизначеністю, нелінійностями, змінами аеродинамічних параметрів, впливом вітру та похибками сенсорів.

У цьому контексті штучний інтелект (ШІ) стає ключовим інструментом, що дозволяє підвищити адаптивність і гнучкість систем керування. Інтеграція алгоритмів машинного навчання, нейронних мереж та методів інтелектуального аналізу даних у системи керування БПЛА відкриває нові можливості для досягнення високої точності траєкторії та автономності польоту.

Метою даної доповіді є детальний аналіз впливу штучного інтелекту на системи керування БПЛА, розгляд основних напрямів його застосування, переваг, обмежень та перспектив подальшого розвитку.

Класичні системи керування БПЛА та їх обмеження

Класичні системи керування БПЛА базуються на теорії автоматичного керування і включають такі методи, як PID-регулятори, LQR, H_{∞} -керування та методи оптимального керування. Дані підходи широко використовуються завдяки простоті реалізації, зрозумілості математичного апарату та наявності формальних методів аналізу стійкості.

Автоматика комп'ютерезовані системи управління				Пояснювальна записка				
Виконавець	Рижков О.О.			Розділ 6			Сторінок	Сторінка
Керівник	Кривоносенко О.П.						25	13
Нормконтро	Дивнич М. П.			Вплив штучного інтелекту на управління БПЛА			М 174 24 СУ	
Охорона п.	Вальченко О.І							
Охорона н.с.	Дмитруха Т.І							

Однак класичні методи мають низку суттєвих обмежень. По-перше, вони потребують точної математичної моделі об'єкта керування, яка на практиці часто є спрощеною. По-друге, параметри регуляторів зазвичай налаштовуються для номінального режиму польоту і не враховують змін умов середовища. По-третє, класичні системи мають обмежену здатність до адаптації та самонавчання.

У складних умовах, таких як поривчастий вітер, відмова сенсорів або зміна масо-габаритних характеристик БПЛА, ефективність класичних регуляторів різко знижується. Саме ці обмеження стимулювали пошук нових підходів, одним із яких є використання штучного інтелекту.

Основи штучного інтелекту в контексті керування

Штучний інтелект у системах керування БПЛА охоплює широкий спектр методів, зокрема машинне навчання, глибокі нейронні мережі, нечітку логіку, генетичні алгоритми та навчання з підкріпленням. Основною відмінністю ШІ від класичних методів є здатність навчатися на основі даних і адаптувати поведінку системи без явного програмування.

У контексті керування БПЛА ШІ може виконувати такі функції:

- апроксимація складних нелінійних залежностей;
- адаптація параметрів керування в реальному часі;
- прогнозування майбутнього стану системи;
- прийняття рішень в умовах невизначеності.

Таким чином, ШІ не замінює класичні методи керування, а доповнює їх, створюючи гібридні інтелектуальні системи керування.

3. Використання ШІ для підвищення точності траєкторії

Одним із ключових напрямів застосування ШІ є підвищення точності слідування заданій траєкторії. Нейронні мережі можуть навчатися на даних польотів та коригувати команди керування з урахуванням реальних відхилень від траєкторії.

Наприклад, алгоритми машинного навчання дозволяють оцінювати вплив вітру та компенсувати боковий знос БПЛА. Це особливо актуально для

малих апаратів, які є чутливими до зовнішніх збурень. Використання ШІ у поєднанні з класичними алгоритмами наведення, такими як LOS або L1, дозволяє суттєво зменшити поперечну похибку траєкторії.

ШІ в адаптивних системах керування

Адаптивні системи керування з використанням ШІ здатні змінювати свої параметри залежно від умов польоту. Наприклад, нейронна мережа може виконувати роль адаптивного налаштовувача коефіцієнтів PID-регулятора.

Такий підхід дозволяє:

- підтримувати оптимальну якість керування в широкому діапазоні режимів;
- зменшити потребу в ручному налаштуванні;
- підвищити стійкість системи до збурень.

Адаптивне керування на основі ШІ є особливо ефективним для БПЛА, що виконують тривалі автономні місії.

ШІ в оцінюванні стану та сенсорному злитті

Оцінювання стану БПЛА є критично важливою задачею для систем керування. Класичні фільтри, такі як Калмана або розширений фільтр Калмана, ефективні за умови лінійності та гаусівських шумів.

Алгоритми ШІ дозволяють покращити процес сенсорного злиття шляхом:

- обробки нелінійних і негаусівських шумів;
- виявлення відмов сенсорів;
- компенсації систематичних похибок.

Поєднання класичних фільтрів і нейронних мереж дозволяє створювати більш надійні системи навігації.

Автономне планування маршруту з використанням ШІ

ШІ відіграє важливу роль у задачах автономного планування маршруту та ухилення від перешкод. Алгоритми пошуку, підкріпленого навчання та комп'ютерного зору дозволяють БПЛА самостійно формувати оптимальний маршрут.

Такі системи здатні:

- реагувати на зміни середовища в реальному часі;
- уникати зіткнень;
- оптимізувати витрати енергії.

ШІ та прийняття рішень у складних умовах

У складних або критичних ситуаціях ШІ може допомагати у прийнятті рішень. Наприклад, при відмові одного з модулів система може автоматично перебудувати стратегію керування.

Це значно підвищує живучість БПЛА та зменшує залежність від оператора.

Переваги застосування ШІ в БПЛА

До основних переваг використання штучного інтелекту належать:

- підвищення точності та стабільності польоту;
- адаптивність до змін умов;
- зростання автономності;
- зменшення впливу людського фактора.

Обмеження та проблеми впровадження ШІ

Незважаючи на переваги, застосування ШІ має низку проблем, серед яких:

- складність навчання і верифікації;
- високі вимоги до обчислювальних ресурсів;
- труднощі сертифікації інтелектуальних систем;
- ризик непередбачуваної поведінки.

Перспективи розвитку інтелектуальних систем керування БПЛА

Подальший розвиток ШІ призведе до створення повністю автономних БПЛА, здатних виконувати складні місії без участі оператора. Очікується широке впровадження гібридних систем керування, що поєднують класичні методи та ШІ.

Висновки частини

Штучний інтелект суттєво впливає на сучасні системи керування БПЛА, підвищуючи їхню точність, адаптивність та автономність. Інтеграція ШІ з класичними методами керування є перспективним напрямом розвитку безпілотних авіаційних систем і відкриває нові можливості для їх практичного застосування.

7 Охорона праці, безпека та безпека життєдіяльності при експлуатації БПЛА

Аналіз потенційних небезпек при роботі з БПЛА

Експлуатація безпілотних літальних апаратів (БПЛА), особливо під час випробувань нових систем керування (MPC), пов'язана з низкою специфічних ризиків.

Технічні та експлуатаційні ризики

Ризик відмови системи керування: Непередбачувані помилки в алгоритмах MPC або EKF/VIO можуть призвести до втрати стабільності, неконтрольованого падіння або несанкціонованого польоту (Flyaway).

Ризик механічного пошкодження: Висока швидкість обертання пропелерів становить загрозу травмування.

Ризик відмови електроживлення: Несправність акумуляторної батареї, коротке замикання або раптове падіння напруги, що призводить до втрати контролю.

Ризик перегріву обладнання: Інтенсивні обчислення MPC-контролера та VIO-процесингу можуть спричинити перегрів бортового комп'ютера або автопілота.

Ризики, пов'язані з навколишнім середовищем

Ризик зіткнення: Зіткнення з іншими повітряними суднами, птахами або наземними об'єктами (особливо при польоті на низькій висоті або в режимі FPV).

Вплив погоди: Політ в умовах сильного вітру, дощу або снігу, що перевищує експлуатаційні обмеження БПЛА, призводить до аварії.

Електромагнітні перешкоди (ЕМП): Політ поблизу ліній електропередач або потужних радіопередавачів, що може призвести до збою GPS-приймача або втрати радіозв'язку з пілотом.

Автоматика комп'ютерезовані системи управління				Пояснювальна записка					
Виконавець	Рижков О.О.			Розділ 7 Охорона праці			Сторінок	Сторінка	
Керівник	Кривоносенко О.П.				25	13	36	87	71
Нормконтро	Дивнич М. П.				М 174 24 СУ				
Охорона п.	Вальченко О.І								
Охорона н.с	Дмитруха Т.І								

Заходи безпеки та охорони праці при роботі з БПЛА

Для мінімізації ідентифікованих ризиків необхідно суворо дотримуватись правил безпечної експлуатації та техніки безпеки.

Організаційні заходи

Чітке зонування: Проведення польотів виключно на спеціально виділених або безпечних полігонах, далеко від людей, будівель та громадських шляхів.

Дозвільна документація: Отримання всіх необхідних дозволів на польоти (залежно від місцевого законодавства).

План польотів та перевірки: Перед кожним польотом обов'язкова перевірка всіх компонентів: заряду батарей, кріплення пропелерів, функціональності сенсорів (IMU, GPS) та зв'язку.

Мінімальна дистанція: Дотримання безпечної відстані між БПЛА та оператором/сторонніми особами під час роботи двигунів.

Технічні заходи безпеки (для СКП)

Режим Fail-Safe (Безпечний відмовостійкий режим): Обов'язкове програмування автопілота на повернення до точки старту (Return to Launch, RTL) або зависання на місці (Loiter) у разі втрати GPS-сигналу, втрати зв'язку (RC Link Loss) або критичного зниження напруги батареї.

Обмеження MPC: У програмному забезпеченні MPC повинні бути жорстко прописані обмеження (Constraints) на максимальну швидкість, висоту та кути нахилу для запобігання небезпечним маневрам.

Кнопка аварійної зупинки (Kill Switch): Призначення на пульті керування кнопки для миттєвого відключення двигунів у критичній ситуації.

Заходи індивідуальної безпеки

Захист очей та рук: Використання захисних окулярів під час роботи з пропелерами та рукавичок при маніпуляціях з батареями та дротом.

Поводження з Li-Po акумуляторами: Зберігання, заряджання та транспортування літій-полімерних батарей лише у вогнестійких контейнерах

(Li-Po bags) та під наглядом, оскільки вони становлять високий ризик займання.

Забезпечення безпеки життєдіяльності та екологічної безпеки

Мінімізація шумового забруднення: Тестування проводити у час та в місцях, де шумовий вплив на навколишнє середовище мінімальний.

Утилізація: Забезпечення правильної утилізації відпрацьованих літій-полімерних акумуляторів та електронних компонентів відповідно до екологічних норм.

Відповідальність: Чітке визначення відповідальності за експлуатацію та наслідки інцидентів.

Висновок частини: Дотримання цих заходів безпеки гарантує, що процес розробки та тестування високоточної СКП (MPC + EKF/VIO) буде проводитися з мінімально можливим ризиком для операторів, обладнання та навколишнього середовища.

8 Охорона навколишнього середовища

Даний розділ дипломної роботи присвячений аналізу впливу експлуатації безпілотного літального апарата (БПЛА), оснащеного високоточною системою керування польотом (СКП) на основі MPC та EKF/VIO, на навколишнє природне середовище. Окрему увагу приділено визначенню потенційних екологічних ризиків та розробці заходів, спрямованих на мінімізацію негативного антропогенного впливу під час розробки, тестування та експлуатації БПЛА.

З огляду на стрімке зростання кількості БПЛА у різних галузях (моніторинг, аерофотозйомка, доставка, наукові дослідження), питання екологічної безпеки набуває особливої актуальності. Використання інтелектуальних систем керування дозволяє не лише підвищити ефективність польоту, але й зменшити негативний вплив на довкілля за рахунок підвищення надійності та прогнозованості роботи літального апарата.

Аналіз впливу експлуатації БПЛА на довкілля

Вплив БПЛА на навколишнє середовище має комплексний характер і може бути класифікований за кількома основними напрямками, пов'язаними з особливостями конструкції, принципами керування та умовами експлуатації.

Шумове забруднення (акустичний вплив)

Джерело шуму.

Основним джерелом шуму БПЛА є пропелерна група, яка створює акустичні коливання внаслідок високої частоти обертання гвинтів та турбулентності повітряних потоків. Додатковий шум може виникати під час виконання різких маневрів, прискорень або гальмувань, які формуються алгоритмом MPC у разі недостатньої оптимізації керуючих впливів.

Автоматика комп'ютерезовані системи управління				Пояснювальна записка					
Виконавець	Рижков О.О.			Розділ 8 Охорона навколишнього середовища			Сторінок	Сторінка	
Керівник	Кривоносенко О.П.				25	13	36	87	74
Нормконтро	Дивнич М. П.				М 174 24 СУ				
Охорона п.	Вальченко О.І								
Охорона н.с	Дмитруха Т.І								

Вплив на довкілля.

Шумовий вплив БПЛА може викликати:

- дискомфорт та стрес у населення;
- порушення міграційних маршрутів та гніздування птахів;
- зміну поведінки диких тварин, особливо у природоохоронних

зонах.

Тривале або систематичне акустичне навантаження може мати накопичувальний негативний ефект, що робить питання шумозниження одним із ключових аспектів екологічної безпеки.

Енергоспоживання та утворення відходів

Джерело екологічного навантаження.

БПЛА використовують літій-полімерні (Li-Po) акумулятори, виробництво яких потребує значних енергетичних ресурсів та використання рідкісних і токсичних матеріалів. Крім того, до складу БПЛА входять електронні компоненти (контролери, сенсори, обчислювальні модулі), які після завершення життєвого циклу стають електронними відходами.

Потенційний вплив.

Неналежне поводження з відпрацьованими батареями та електронікою може призвести до:

- забруднення ґрунтів важкими металами;
- потрапляння токсичних речовин у ґрунтові та поверхневі води;
- підвищення пожежної небезпеки на сміттєзвалищах.

Ризик фізичного пошкодження природного середовища

Джерело ризику. Аварійні ситуації, пов'язані з відмовою системи керування, зіткненням або впливом несприятливих погодних умов, можуть призвести до падіння БПЛА в екологічно чутливих районах.

Можливі наслідки.

- механічне пошкодження рослинного покриву;
- локальне забруднення ґрунту електролітом з акумулятора;

- ризик виникнення лісових або степових пожеж у разі займання Li-Po батареї;
- порушення середовища існування тварин.

Заходи щодо забезпечення екологічної безпеки

З метою зменшення негативного впливу експлуатації БПЛА на навколишнє середовище у дипломній роботі запропоновано комплекс технічних, організаційних та експлуатаційних заходів.

Зменшення шумового забруднення

Оптимізація траєкторій МРС.

Система прогнозного керування дозволяє включити до цільової функції додаткові критерії, що штрафують різкі зміни керуючих сигналів та надмірні прискорення. Це забезпечує плавнішу траєкторію польоту, зниження пікових обертів двигунів і, як наслідок, зменшення рівня шуму.

Використання акустично ефективних компонентів.

Застосування пропелерів зі зменшеним рівнем шуму, оптимізованим профілем лопатей та відповідним співвідношенням діаметра і кроку дозволяє суттєво знизити акустичне навантаження без втрати тягових характеристик.

Регламентация часу та місця польотів.

Тестування та експлуатацію БПЛА доцільно проводити у світлий час доби, у віддалених від житлових зон районах та за межами природоохоронних територій.

Поводження з відходами та Li-Po акумуляторами

Контроль життєвого циклу батарей.

Впровадження обліку циклів заряд-розряд та температурних режимів експлуатації дозволяє своєчасно виводити батареї з експлуатації до моменту їх деградації або аварійного пошкодження.

Безпечна утилізація.

Відпрацьовані або пошкоджені Li-Po акумулятори повинні передаватися

виключно ліцензованим підприємствам з утилізації небезпечних відходів. Забороняється викидання батарей разом із побутовими відходами.

Екологічно орієнтований вибір матеріалів. За можливості рекомендується використання матеріалів, придатних до вторинної переробки, а також безсвинцевих припоїв при монтажі електронних компонентів.

Запобігання аваріям та вторинному забрудненню
Вимоги до Fail-Safe режимів.

СКП повинна забезпечувати автоматичний перехід у безпечний режим при: критичному зниженні напруги акумулятора; втраті навігаційних даних EKF/VIO; втраті зв'язку з оператором.

При цьому пріоритет надається контрольованій посадці на відкритих ділянках з мінімальним екологічним впливом.

Зниження ризику зіткнень. Висока точність оцінювання стану за допомогою EKF/VIO у поєднанні з прогнозним керуванням MPC зменшує ймовірність неконтрольованих відхилень та аварій, що є ключовим чинником зниження екологічних ризиків.

Екологічна оцінка маршрутів. Планування польотів повинно враховувати виключення або мінімізацію перебування БПЛА над:

- водозабірними спорудами;
- заповідними та рекреаційними зонами;
- місцями сезонної активності тварин і птахів.

Додаткові аспекти екологічної відповідальності

Важливим елементом екологічної безпеки є формування відповідального підходу до експлуатації БПЛА. Оператор повинен усвідомлювати потенційні екологічні наслідки своєї діяльності та дотримуватися принципів раціонального природокористування. Це включає документування інцидентів, аналіз причин аварій та впровадження коригувальних заходів для запобігання повторенню подібних ситуацій.

Висновок до розділу

Застосування високоточної системи керування польотом на основі МРС та ЕКФ/VIО не лише підвищує ефективність і точність керування БПЛА, але й сприяє зниженню негативного впливу на навколишнє середовище. Підвищена надійність, прогнозованість та контрольованість польоту зменшують ймовірність аварійних ситуацій, фізичного пошкодження довкілля та забруднення. Реалізація запропонованих заходів екологічної безпеки дозволяє забезпечити відповідність експлуатації БПЛА сучасним вимогам сталого розвитку та екологічної відповідальності.

Висновки

У даній роботі було всебічно розглянуто вплив штучного інтелекту на системи керування безпілотними літальними апаратами з акцентом на підвищення точності траєкторії польоту, автономності та надійності функціонування. Проведений аналіз охоплює як класичні підходи до керування БПЛА, так і сучасні інтелектуальні методи, що базуються на алгоритмах штучного інтелекту.

У першій частині роботи було показано, що традиційні системи керування, побудовані на PID-регуляторах, алгоритмах LOS та L1-наведення, забезпечують базову стабілізацію та керованість БПЛА, однак мають обмежену адаптивність до змін зовнішніх умов. Вони ефективні лише за умови відносної сталості параметрів середовища та точності математичної моделі апарата.

Далі було обґрунтовано доцільність використання штучного інтелекту як інструменту розширення можливостей класичних систем керування. Показано, що алгоритми машинного навчання та нейронні мережі дозволяють компенсувати вплив зовнішніх збурень, покращити оцінювання стану БПЛА, зменшити поперечну похибку траєкторії та забезпечити адаптацію системи керування в реальному часі.

Окрему увагу було приділено сценаріям польоту з використанням штучного інтелекту, зокрема польоту з компенсацією збурень, автономному обльоту перешкод, роботі в умовах часткової відмови сенсорів, адаптивному польоту в змінному середовищі та груповому польоту БПЛА. Дані сценарії демонструють суттєву перевагу інтелектуальних систем керування над традиційними алгоритмами.

Для забезпечення повноти дослідження також було розглянуто сценарії польоту без використання штучного інтелекту. Проведене порівняння показало, що класичні алгоритми характеризуються високою передбачуваністю та простотою реалізації, однак поступаються інтелектуальним системам за рівнем адаптивності, точності та автономності.

На основі результатів моделювання та аналітичного огляду можна зробити висновок, що оптимальним підходом до побудови сучасних систем керування БПЛА є використання гібридних архітектур, у яких класичні методи автоматичного керування поєднуються з алгоритмами штучного інтелекту. Такий підхід дозволяє зберегти формальну стійкість і прогнозованість системи, водночас забезпечуючи її здатність до адаптації та самонавчання.

Отримані результати підтверджують, що застосування штучного інтелекту є перспективним напрямом розвитку систем керування БПЛА та створює передумови для реалізації високоточних, автономних і надійних безпілотних авіаційних систем нового покоління. Штучний інтелект суттєво впливає на сучасні системи керування БПЛА, підвищуючи їхню точність, адаптивність та автономність. Інтеграція ШІ з класичними методами керування є перспективним напрямом розвитку безпілотних авіаційних систем і відкриває нові можливості для їх практичного застосування.

У межах даної роботипослідовно виконано повний комплекс завдань, спрямованих на розкриття теми систем керування польотом безпілотних літальних апаратів із підвищеною точністю траєкторії руху та аналізу ролі штучного інтелекту в таких системах.

На початковому етапі було сформовано та проаналізовано розрахункову частину системи керування БПЛА. Проведено математичне та імітаційне моделювання руху апарата, реалізовано класичні алгоритми керування та навігації, а також виконано чисельні експерименти методом Monte-Carlo. Отримані результати дозволили кількісно оцінити поперечну похибку траєкторії та точність оцінювання положення БПЛА.

Далі було детально розглянуто вплив штучного інтелекту на системи керування БПЛА. Показано, що застосування алгоритмів машинного навчання та нейронних мереж дозволяє значно підвищити точність слідування траєкторії, адаптивність до зовнішніх збурень, автономність польоту та надійність навігації. Окрему увагу приділено ролі ШІ в адаптивному

керуванні, сенсорному злитті, автономному плануванні маршруту та прийнятті рішень у складних умовах.

У роботі було сформовано та описано сценарії польоту БПЛА з використанням штучного інтелекту, зокрема: політ із компенсацією збурень, автономний обліт перешкод, робота при частковій відмові сенсорів, адаптивний політ у змінному середовищі та груповий політ декількох БПЛА. Ці сценарії продемонстрували переваги інтелектуальних систем керування над класичними підходами.

Для забезпечення повноти дослідження також були розглянуті сценарії польоту без використання штучного інтелекту, що базуються на традиційних алгоритмах керування, жорстко заданій логіці та участі оператора.

Список використаних джерел

1. Johannes Meyer, Alexander Sendobry, Stefan Kohlbrecher, Uwe Klingaufl, and Oskar von Stryk, “Comprehensive Simulation of Quadrotor UAVs using ROS and Gazebo”. In: IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots, pp. 400-411 (2012)
2. Адамов Олександр Петрович, Адамова Аріна Олександрівна, Герасимов Микита Вячеславович - Аналіз експлуатації мультикоптерів з позиції надійності та безпеки // НІКС. 2017. №3(19).
3. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0031-17#Text>
4. <https://nau.edu.ua/site/variables/news/2018/12/disert%20Tachinina.pdf>
5. Stasenko D. V., Ostrovka D. V., Tesljuk V. M. Rozroblennja avtonomnoji systemy keruvannja mobiljnoju robototekhnichnoju systemoju z vykorystannjam modelejna pidstavi shtuchnykh neŷromerezh. Naukovyj visnyk NLTU Ukrajinjy, 2021. 31 (6), S. 112–117. <https://doi.org/10.36930/40310617>.
6. Akhloufi M. A., Castro N. A., Couturier A., Unmanned aerial systems for wildland and forest fires: Sensing, perception, cooperation and assistance, Drones, 2021, vol. 5, no. 15, doi: 10.3390/drones5010015.
7. Bereznyi A., Trystan A., Lavrov O. Information technology of automatic detection and identification of stationary objects with unmanned aerial vehicles. Suchasni informacijni systemy. Kharkiv, 2020. Vyp. 4(1). S. 5–10. doi:10.20998/2522–9052.2020.
8. Bustos A. P. et al. Visual SLAM: why bundle adjust? International conference on robotics and automation (ICRA). Montreal, QC, Canada. 20–24 May. 2019. 1043. doi: <https://doi.org/10.1109/icra.2019.8793749>.
9. Hart, S.; Steane, V.; Bullock, S.; Noyes, J.M. Understanding Human Decision-Making when Controlling UAVs in a Search and Rescue Application. Hum. Interact. Emerg. Technol. 2022, 68. <https://doi.org/10.54941/ahfe1002768>.
10. Guo, X.; Hou, S.; Niu, P.; Zhao, D. A Review of Control Methods for Quadrotor UAVs. In Proceedings of the 2022 5th International Conference on

Electronics and Electrical Engineering Technology (EEET), Beijing, China, 2–4 December 2022; pp. 132–138. <https://doi.org/10.1109/EEET58130.2022.00030>.

11.Ivanov D. Periodic formation within a large group of mobile robots in conditions of limitedcommunications. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1046. Cham: Springer, 2019. S. 107–112. doi: 10.1007 / 978–3–030–30329–7_10.

12.Jiang G. et al. A simultaneous localization and mapping (SLAM) framework for 2.5D map building based on low-cost lidar and vision fusion. *Applied sciences*. 2019. Vol. 9, # 10. 2105. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9102105>.

13.Khan, M.; Qureshi, I.; Khanzada, F. A hybrid communication scheme for efficient and low-cost deployment of future flying ad hoc network (FANET). *Drones* 2019, 3, 16. <https://doi.org/10.3390/drones3010016>.

Додаток1

Виведення даних польоту дрона

```
latitude = data1 [ ' latitude ' ] . to_numpy ( )
longitude = data1 [ ' longitude ' ] . to_numpy ( )
time = data1 [ ' time ( milliseconds ) ' ] . to_numpy ( )
delta_t = ( time [ 1 : ] = time [ : =1 ] )
delta_t = delta_t [ : : =1 ]
delta_t = np . insert ( delta_t , 0 , 100 )
# speed in meters per millisecond
x_speed = data1 [ ' _ xSpeed (mph) ' ] . to_numpy ( ) *
* 1609.344/3600000
y_speed = data1 [ ' _ ySpeed (mph) ' ] . to_numpy ( ) *
* 1609.344/3600000
# distance in meters
xDistance = np . cumsum ( x_speed * delta_t )
yDistance = np . cumsum ( y_speed * delta_t )
# Euler ' s method
xE = np . insert ( xDistance , 0 , 0 )
yE = np . insert ( yDistance , 0 , 0 )
# Runge-Kutta method
xRK = array ( ' f ' , ( ) )
yRK = array ( ' f ' , ( ) )
x_0 = 0
y_0 = 0
for i in range ( 0 , int ( len ( xDistance ) ) =1 ):
xRK. append ( x_0 )
yRK. append ( y_0 )
x_0 = x_0 + 0 . 5 * ( x_speed [ i +1 ] + x_speed [ i ] ) *
* delta_t [ i ]
y_0 = y_0 + 0 . 5 * ( y_speed [ i +1 ] + y_speed [ i ] ) *
```

```

* del ta_t [ i ]
print ( " accu rac y _ i n _ me t re s _ ( Eule r ' s _ method ) : " ,
math . s q r t ( ( x[ =1] = xE[ =1] ) ** 2 +
( y[ =1] = yE[ =1] ) ** 2 ) )
print ( " accu rac y _ i n _ me t re s _ ( Runge=Kutta _ method ) : " ,
math . s q r t ( ( x[ =1] = xRK[ =1] ) ** 2 +
( y[ =1] = yRK[ =1] ) ** 2 ) )
print ( " la n di ng _ poi n t : " , xRK[ =1] , yRK[ =1] , y2 [ =1] )

```

Додаток2

Виведення похибки в куті yaw та в
дистанції, яку пролітає БПЛА

```
fig, ax = plt.subplots()
ax.plot(time,
data [ ' _ compass_heading ( d e g r e e s ) ' ] . to_numpy ( ) ,
label=" compass_heading " )
ax.plot ( time , angle , label="yaw" , )
ax.set_xlabel ( ' time _ ( m i l l i s e c o n d ) ' )
ax.set_ylabel ( ' d e g r e e s ' )
ax.legend ( )
plt.show ( )
fig, ax = plt.subplots ( )
ax.plot ( time , d i s t a n c e ,
label=" d i s t a n c e _ b a s e d _ o n _ s a t e l l i t e _ d a t a " )
ax.plot ( time , data [ ' d i s t a n c e ( f e e t ) ' ] . to_numpy ( ) *
* 0.3048 ,
label=" d i s t a n c e _ b a s e d _ o n _ _ d a t a " , )
ax.set_xlabel ( ' time _ ( m i l l i s e c o n d ) ' )
ax.set_ylabel ( ' m e t e r s ' )
ax.legend ( )
plt.show ( )
plot_trajectory ( longitude , latitude )
```