

Дослідження доцільності використання технології орнітоптера та розробка системи керування польотом

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.108>

В'ячеслав Вечер

Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
bondar.v_ak19@nuwm.edu.ua

Дмитро Реут

Національний університет водного господарства та природокористування
м. Рівне, Україна
d.t.reut@nuwm.edu.ua

Анотація — У даній роботі представлено аналіз результатів дослідження технології орнітоптерів, визначення їх аеродинамічних характеристик, факторів, які впливають на ефективність та стабільність їх польоту, а також розроблені рекомендації щодо оптимізації конструктивних характеристик орнітоптера, їх переваг та недоліків у порівнянні з іншими типовими конструкціями БПЛА.

Ключові слова — автоматизація контролю польоту; БПЛА; орнітоптер;

I. ВСТУП

Безпілотні Літальні Апарати (БПЛА) сьогодні є однією з основних технологічних галузей для розвитку та дослідження. Дана технологія є незамінною для збору розвідувальних даних різного значення, що вводить її в сферу комерційних послуг, наукової та військової діяльності. Остання зі сфер особливо актуальна для України, яка в умовах оборонної війни проти російської федерації активно використовує безпілотні системи у якості засобів протиповітряної оборони (ППО), керованих боеприпасів, розвідувальних апаратів тощо. Таким чином вдосконалення технологій БПЛА має стратегічне значення. Зростаючі вимоги до маневреності, автономності та енергоефективності підштовхують до пошуку нових підходів до конструювання безпілотників.

Однією з перспективних технологій є махове крило (орнітоптери), яке імітує природні рухи птахів та комах. У сферах застосування орнітоптери здатні запропонувати високу надійність польоту, коштом відсутності відкритих роторів і високої маневреності зумовленої здатністю до зміни форми крила. Такий дрон з високою ймовірністю буде здатний до польоту навіть після випадку зіткнення з об'єктом, що робить їх ефективними для застосування на малих висотах і у вузьких просторах. При цьому він лишається здатним до більших перельотів на висоті, що робить його універсальним.

Однак, попри перспективність, технологія орнітоптерів не отримала широкого впровадження в

областях, за винятком дослідницької. Основними причинами є конструктивні виклики, що до сьогодні не були доцільними до вирішення через наявність простіших у виконанні роторних дронів, а також через складнощі в забезпеченні стабільності польоту та точного управління.

Це дослідження має на меті оцінити доцільність впровадження орнітоптерів як сучасних безпілотних систем, зосереджуючись на вивченні їх аеродинамічних характеристик, ефективності та можливих шляхах удосконалення конструкції. Важливою частиною роботи є порівняння орнітоптерів з іншими типами БПЛА, щоб визначити переваги та недоліки цієї технології в різних умовах експлуатації.

II. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОГЛЯД

A. Основи технології орнітоптерів

Технологія махових крил, яка використовується в орнітоптерах, базується на природних механізмах польоту птахів і комах. Основний принцип полягає у створенні підйімальної сили та тяги через циклічні коливальні рухи крил, які взаємодіють з повітряними потоками. Ці коливання дозволяють орнітоптерам ефективно літати на низьких швидкостях і маневрувати у складних умовах, де інші типи дронів можуть бути менш ефективними.

Залежно від конструкції, орнітоптери мають кілька основних конфігурацій, які впливають на їх польотні характеристики:

- **Моноплан:** Орнітоптер з однією парою крил. Така конструкція забезпечує підвищену маневреність на низьких швидкостях і більшу простоту виготовлення, але може мати проблеми зі стабільністю на вищих швидкостях, якщо крила недостатньо жорсткі або неправильно налаштовані. Залежно від форми крила, точності балансування і розташування центру мас він може бути менш стабільним під час польоту на більших швидкостях.

- **Біплан:** Конструкція з двома парами крил, розташованими один над одним, що базується на принципах створення області зменшеного тиску між ними при розходженні та збільшенні відштовхування загальною площею крила. Така конструкція має додаткову підймальну силу та покращує стабільність польоту, ціною більших енерговитрат задля забезпечення необхідного зусилля та частот руху крила.
- **Тандемна схема:** Орнітоптер з двома парами крил, розташованими одне за іншим. Цей тип конструкції забезпечує можливість більш рівномірного розподілу ваги та підвищеної стабільності в польоті. Однак такі орнітоптери можуть втрачати маневреність, порівняно з монопланами, через складність управління обома парами крил одночасно.
- **Безхвості орнітоптери:** Орнітоптери, що у своїй конструкції позбавлені традиційного хвоста, де стабільність забезпечується коштом керування крилами. задля зниження ваги та аеродинамічного опору. Відсутність хвоста знижує вагу і аеродинамічний опір, проте такі орнітоптери менш стабільні і вимагають більш точної системи керування і навичок пілотування. Залежно від конструкції, як і будь-який інший дрон, орнітоптер є більш чи менш відповідним для різного роду завдань. Біплани та тандеми є найпопулярнішими і збалансованими схемами. Тандемні збірки є найбільш стійкими і схожі за характеристиками до коптерів.

Але ключовим елементом для ефективного польоту орнітоптера є здатність крила ефективно змінювати замах підтримуючи баланс між підйальною силою і тягою, як це реалізовано зміною позиції крил птахів комах. Форма крил і механіка змаху є ключовими для ефективності польоту орнітоптера. Вибір форми крила впливає на баланс між підйальною силою і аеродинамічним опором.

Синусоїдальний або еліптичний рух [4], що поєднує плоский і горизонтальний замах, збільшує ефективність та стабільність польоту навіть у турбулентних умовах. Використання легких та гнучких матеріалів зводить будь-який плоский чи горизонтальний замах до певної форми коливання, але він це може бути реалізовано і методом механічного згину крила або його механічного спрямування.

Використання механічного спрямування позиції крила надає можливість більшої імітації живої природи, що означає можливості адаптуватися до швидкісного або маневреного польоту, але вимагає складного конструювання механізму передачі моменту, через що даний метод часто ігнорується. До нього ж слід віднести махання із затримкою у фазі, коли крила призупиняються в нижній точці змаху, забезпечуючи додаткову підймальну силу на певний час і даючи потоку повітря відступити від крила.

Єдиним оптимально реалізованим сьогодні способом оптимізації льотних характеристик

орнітоптера є додавання суглобів із направляючими, що реалізують зміну форми крила таким чином, що збільшує відштовхувальну силу замаху і зменшує опір у різні моменти руху крилом. Така складна і відрегульована конструкція суттєво збільшує вагу механізму, але, за правильної реалізації, це компенсується збільшенням характеристик тяги й підйальної сили.

Отже основною проблемою побудови орнітоптера є реалізація ефективного замаху. Будь-який рух, складніший за простий підйом-спуск, потребує механічного та/або програмного рішення. Свого часу подібна задача стояла при розв'язанні проблеми реалізації засобів контролю багатороторних БПЛА. У їх випадку проблема, як і результат її вирішення, мали чітку задачу синхронізації керування елементами системи, що визначало результат. Своєю чергою конструктивні особливості орнітоптерів є надто індивідуальними і потребують механічної реалізації, до того ж їх аеродинамічні принципи є недостатньо вивчені, через що будь-яка конструкція потребує додаткового аналізу для покращення бажаних характеристик.

Додатковою складністю слід зазначити забезпечення захисту від зношення двигуна при змінах тиску крила та посиленних крутних моментах при зміні повітряного потоку. Зміна навантаження на крило при замаху може виснажувати ресурс двигуна, що означає потребу у реалізації амортизації крутного моменту в редукторі силової установки

В. Автоматизація процесів польоту орнітоптера

У даній роботі за основу використано модель орнітоптера “Freebird” представлену Натаном Хроністером у 1993 році.

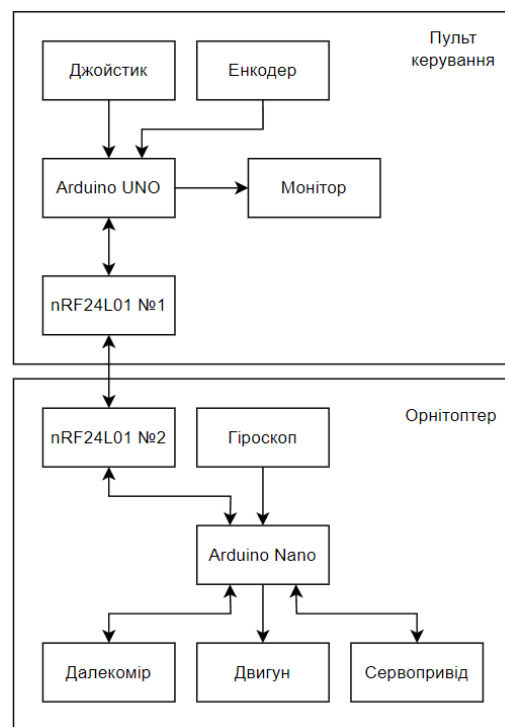


Рисунок 1. Структурна схема розробленої системи

Система складається з двох основних компонентів: пульта керування на основі Arduino UNO та самого орнітоптера на основі Arduino Nano. Загальна схема системи представлена на Рисунку 1.

Для ефективного управління орнітоптером йому необхідна інтеграція основного набору сенсорів задля моделювання стану орнітоптера у реальному часі [5] з метою регулювання. У цю групу входять:

- Гіроскоп: для отримання даних про кутові швидкості та лінійні прискорення, що дозволяє контролювати положення та орієнтацію апарату в просторі.
- Датчик положення крил: відстежує фазу та амплітуду махових рухів, що є критичним для синхронізації та контролю махання. Ним слугуватиме ультразвуковий датчик HC-SR04, закріплений перпендикулярно до крила в нижньому положенні.

Модулі NRF24L01 на контролері та дроні забезпечують двосторонній зв'язок із використанням парсингу. Використання парсингу структурує зв'язок між контролером та дроном, полегшуючи обробку команд і візуалізації даних телеметрії.

Контролер базується на мікроконтролері Arduino UNO, який отримує вхідні сигнали від джойстика та енкодера.

- Джойстик на контролері відповідає за керування поворотом хвоста орнітоптера, забезпечуючи маневрування під час польоту.
- Кнопка на джойстику використовується для перемикання між режимами польоту, такими як політ і планування.
- Енкодер регулює швидкість обертання двигуна, що задає частоту махання крил.
- Кнопка енкодера використовується для ввімкнення або вимкнення двигуна.

Під час запуску системи відбувається її калібрування. На певний час вмикається двигун, а далекомір фіксує мінімальне та максимальне значення відстані до крила. Після калібрування програма дає сигнал двигуна обертатися до положення, де відстань до крила максимальна. При активації режиму планування крило встановлюється на позицію, що відповідає 70% від максимального значення відстані, забезпечуючи оптимальне горизонтальне положення крил для планування.

Фіксація положення крила дозволяє також реалізувати «затримку у нижній фазі крила», для

підвищення ефективності відштовхування повітря. Двигун зупиняється на короткий час у нижній точці маху, коли відстань до крила мінімальна, дозволяючи потоку повітря покинути область крила не створюючи вихору, який би потягнув крило назад під час підйому. Час затримки змінюється вручну, відповідно до ваги і балансування дрона. Після затримки двигун продовжує обертання, виконуючи наступний цикл маху. Це збільшує ефективність тяги, але також підвищує навантаження на двигун, що впливає на його експлуатаційний ресурс.

Контроль звалювання працює на основі порівняння бажаних і реальних даних. Бажаними вважаються дані положення джойстика, а реальними є дані гіроскопа та нахилу сервопривода. Гіроскоп постійно вимірює кути нахилу дрона, і якщо значення перевищують встановлені межі, або якщо оператор задає команди, що можуть призвести до звалювання, система виконує коригувальні дії.

III. ВИСНОВКИ

У даному дослідженні було оглянуто принципові особливості орнітоптерів як перспективного напрямку розвитку БПЛА. Враховуючи унікальні аеродинамічні характеристики орнітоптерів, можуть бути більш адаптивними для певних видів повітряного спостереження та транспортування. Проте, попри значний потенціал і адаптивність, орнітоптери вимагають набагато складніших методів моделювання, що робить технологію дорогою. Основною проблемою є впровадження ефективніших легких джерел живлення та механізмів передачі зусилля.

Розроблена система керування орнітоптером продемонструвала можливість автоматизації основних критеріїв польоту дрона на основі стандартних компонентів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] "The Ornithopter Design Manual", [Online]. Available: <https://www.ornithopter.org/archive/ODM5.pdf>
- [2] "Other Flapping Wing Designs", ornithopter.de, [Online]. Available: <http://www.ornithopter.de/english/wings.html>
- [3] "Tracing the History of the Ornithopter: Past, Present, and Future", [Online]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/7071/b298cf62e6b553588f09d4fcaa339ad9d9d9.pdf>
- [4] "Design, Development and Operational of an Ornithopter", [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/340741611_Design_Development_and_Operational_of_an_Ornithopter
- [5] "Conceptual Study of Ornithopter for Better Future Performance and Application", [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/374252970_Conceptual_Study_of_Ornithopter_for_Better_Future_Performance_and_Application