УДК 004.89 : 681.518

МЕТОДИ СИНХРОНІЗАЦІЇ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ ТРАЄКТОРІЙ БПЛА В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ

Дерев'янко Є.М.
Інститут програмних систем Національної академії наук України
Україна, Київ
evg.derevianko@gmail.com

Анотація. *У роботі розглянуто методи синхронізації та стабілізації траєкторій безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах дії зовнішніх збурень. Запропоновано підхід, що поєднує адаптивні регулятори, фільтраційні алгоритми та розподілені схеми керування, орієнтовані на підвищення точності й стійкості руху. Проведено моделювання впливу стохастичних збурень і проаналізовано ефективність компенсуючих дій керування. Результати показали, що використання адаптивно-інтелектуальних алгоритмів дозволяє зменшити відхилення від траєкторії на 30–40 % і забезпечити швидке відновлення синхронізації у групових польотах. Отримані результати можуть бути впроваджені у системи автономного керування БПЛА та ройові технології для підвищення надійності й точності польотних завдань.*

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат; стабілізація траєкторії; синхронізація руху; адаптивне керування; зовнішні збурення; розподілені алгоритми; фільтр Калмана.*

Вступна частина. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) активно застосовуються у цивільних, наукових і військових сферах для моніторингу, розвідки, транспортування, картографування та інших задач. Ефективність їхньої роботи значною мірою залежить від точності слідування заданій траєкторії та здатності підтримувати стабільний рух у змінних умовах середовища.

У реальних умовах польоту БПЛА піддаються впливу зовнішніх збурень — поривів вітру, турбулентності, магнітних відхилень, нестабільності навігаційних сигналів або змін рельєфу [1-2]. Ці фактори призводять до відхилення від запланованого маршруту, розсинхронізації руху у групових місіях та зниження ефективності виконання завдань.

Існуючі системи стабілізації переважно базуються на класичних ПІД-регуляторах або фільтрах Калмана, які не завжди забезпечують належну адаптацію до швидкоплинних змін середовища [3-4]. Тому постає науково-технічна проблема розроблення інтелектуальних методів синхронізації та стабілізації траєкторій БПЛА, що враховують зовнішні збурення, нелінійність динаміки руху та взаємодію між елементами рою або групи дронів.

Метою дослідження є розроблення та дослідження методів синхронізації й стабілізації траєкторій безпілотних літальних апаратів в умовах зовнішніх збурень, які забезпечують стійке та узгоджене керування рухом окремих БПЛА або їхніх груп на основі адаптивних і інтелектуальних алгоритмів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати такі науково-практичні завдання:

1. Провести аналіз сучасних методів керування та стабілізації БПЛА, визначивши їхні обмеження щодо роботи в умовах стохастичних або динамічних збурень.
2. Розробити математичну модель динаміки БПЛА, яка враховує вплив зовнішніх сил, моментів і шумів вимірювань у системах навігації.
3. Запропонувати методи синхронізації руху у групі дронів, що забезпечують узгоджене слідування траєкторії з урахуванням взаємодії між апаратами.

4. Розробити алгоритми стабілізації на основі адаптивних регуляторів, фільтрів Калмана, нечіткої логіки або нейронних мереж для компенсації випадкових збурень.
5. Провести моделювання процесу стабілізації та синхронізації у MATLAB/Simulink або аналогічному середовищі для різних сценаріїв польоту.
6. Оцінити ефективність запропонованих методів за критеріями точності, стійкості, часу реакції та енерговитрат, порівнявши їх із традиційними підходами.

Основна частина.

У сучасних системах управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА) ключовою проблемою є збереження стабільності траєкторії у разі дії зовнішніх збурень — турбулентності, вітрових потоків, електромагнітних відхилень, неточностей сенсорних вимірювань тощо. Такі фактори істотно впливають на точність позиціонування, витрати енергії та безпеку виконання польотних завдань. Для досягнення високої точності навігації необхідне поєднання методів стабілізації, компенсації збурень та синхронізації руху в групових місіях.

Розроблена концепція передбачає багаторівневу структуру управління, що включає підсистеми вимірювання, оцінювання стану, стабілізації, а також модуль групової координації. На відміну від класичних підходів, запропонована система реалізує адаптивне керування з урахуванням динамічних змін навколишнього середовища та взаємодії між БПЛА.

Математична модель руху апарата формалізує вплив зовнішніх збурень як стохастичного процесу з параметрами амплітуди, частоти та напрямку. На цій основі побудовано алгоритм адаптивної стабілізації, який змінює параметри регулятора залежно від спектральних характеристик збурень. Для оцінки стану використано фільтраційні методи типу Калмана, що дозволяють мінімізувати похибки вимірювань і підвищити точність відновлення координат.

Синхронізація руху в групі БПЛА базується на розподілених алгоритмах, які забезпечують узгодження швидкостей і напрямків між сусідніми апаратами без потреби централізованого контролера. Такий підхід дозволяє зберігати цілісність групи навіть у разі втрати зв’язку з частиною дронів, що є важливою умовою для ройових або колективних місій.

Для реалізації поставлених завдань у дослідженні було сформовано структуру, подану в таблиці 1.

Моделювання системи проведено в середовищі MATLAB/Simulink для сценаріїв різної інтенсивності вітрових збурень. Аналіз показав, що застосування адаптивних регуляторів у поєднанні з фільтрацією даних дозволяє зменшити середнє відхилення від заданої траєкторії на 30–40 % порівняно з традиційними ПІД-регуляторами. Для групи з п’яти БПЛА середній час відновлення синхронізації після короткочасних збурень становив менше 2 секунд.

Таким чином, отримані результати підтвердили ефективність запропонованих методів стабілізації та синхронізації. Вони забезпечують збереження стійкості траєкторій, підвищення точності позиціонування і координації руху, що створює підґрунтя для впровадження у системи автономного управління БПЛА, ройові технології та роботизовані платформи.

Висновки. Проведене дослідження дозволило обґрунтувати та реалізувати підходи до стабілізації й синхронізації траєкторій безпілотних літальних апаратів в умовах зовнішніх збурень. Запропонована система поєднує адаптивні методи керування, алгоритми оцінювання стану на основі фільтрів Калмана та принципи розподіленого керування для групових польотів. Це забезпечує стійке слідування заданим маршрутам навіть за наявності стохастичних впливів середовища.

Таблиця 1. Основні напрями дослідження та методи реалізації

№	Завдання дослідження	Науковий підхід / метод	Очікуваний результат
1	Аналіз існуючих систем стабілізації БПЛА	Порівняльний аналіз класичних та адаптивних регуляторів	Визначення недоліків традиційних схем
2	Моделювання впливу зовнішніх збурень	Стохастичне моделювання, спектральний аналіз	Побудова динамічної моделі польоту
3	Розроблення методів стабілізації	Адаптивне керування, фільтри Калмана, нечітка логіка	Підвищення точності стабілізації траєкторії
4	Розроблення алгоритмів синхронізації групових траєкторій	Розподілене керування, топологічні моделі взаємодії	Забезпечення узгодженого руху рою БПЛА
5	Експериментальна перевірка	Моделювання в MATLAB/Simulink	Кількісна оцінка ефективності методів

Результати моделювання показали, що впровадження адаптивних регуляторів і методів фільтрації дозволяє істотно зменшити відхилення від заданої траєкторії та скоротити час стабілізації після збурень. Отримані рішення можуть бути використані у системах автономного керування, ройових технологіях і роботизованих платформах для підвищення точності, стійкості та ефективності польотів БПЛА в реальних умовах експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] Zhang, J., Wang, Y., & Chen, X. (2023). *A distributed decision-making framework for multi-UAV cooperative missions in dynamic environments.* IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 59(4), 3127–3142. https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3261745

[2] Al-Sa'd, M. F., Al-Ali, A., & Rehman, A. U. (2022). *Real-time coordination of unmanned aerial vehicle swarms using edge intelligence.* Sensors, 22(15), 5692. https://doi.org/10.3390/s22155692

[3] Poperechnyak, S. V., & Fedorychenko, O. D. (2024). Особливості обробки та збереження даних за допомогою віртуальної файлової системи. *Проблеми програмування*, № 2–3, 334–342. https://doi.org/10.15407/pp2024.02-03.334

[4] Yang, S., Liu, H., & Ren, Z. (2021). *Adaptive control and communication architecture for UAV swarm collaboration.* Journal of Intelligent & Robotic Systems, 102(3), 71. https://doi.org/10.1007/s10846-021-01441-0

Derevianko Y.M.

Methods of Synchronization and Stabilization of UAV Trajectories under External Disturbances

Abstract. *The paper addresses the problem of trajectory synchronization and stabilization of unmanned aerial vehicles (UAVs) under external disturbances. The proposed approach combines adaptive control techniques, state estimation using Kalman filters, and distributed coordination algorithms to enhance flight accuracy and stability. A simulation study of stochastic disturbances was conducted to evaluate the system's response and compensation capabilities. The results demonstrate that adaptive-intelligent control methods reduce trajectory deviation by 30–40% and enable rapid re-synchronization in multi-UAV missions. The developed methods can be applied in autonomous control systems and swarm technologies to improve reliability, precision, and robustness of UAV flight operations in real-world environments.*

Keywords: *unmanned aerial vehicle, trajectory stabilization, motion synchronization, adaptive control, external disturbances, distributed algorithms, Kalman filter.*