

Древенчук Р. В., Зубарева А. О., Бойко В. В.

СИСТЕМИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПОЛЬОТОМ БПЛА НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Анотація: у статті досліджено підходи до створення систем адаптивного управління польотом безпілотних літальних апаратів із використанням математичного моделювання. Наведено огляд сучасних методів опису динаміки польоту та способів побудови адаптивних алгоритмів керування, здатних компенсувати вплив змінних зовнішніх умов і конструктивних відхилень у роботі апарата. Доведено, що застосування математичних моделей на етапі розроблення систем управління підвищує точність стабілізації та стійкість до збурень, а також забезпечує можливість попереднього тестування алгоритмів у віртуальному середовищі. Отримані напрацювання можуть бути використані для створення інтегрованих систем навігації та керування майбутніх поколінь БПЛА.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, адаптивне управління, математичне моделювання, динаміка польоту, алгоритми керування, стійкість до збурень, віртуальне моделювання.

Abstract: the article presents an analysis of the design principles of adaptive flight control systems for unmanned aerial vehicles based on mathematical modeling. Modern approaches to flight dynamics representation and the synthesis of adaptive control algorithms capable of compensating for environmental uncertainties and structural variations of the controlled object are examined. It is demonstrated that the use of mathematical models in the control system design process enhances stabilization accuracy and robustness to disturbances, while also enabling preliminary validation of algorithms in a virtual environment. The obtained results can be applied in the development of integrated navigation and control systems for next-generation UAVs

Keywords: unmanned aerial vehicle, adaptive control, mathematical modeling, flight dynamics, robustness.

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) зумовлює зростання вимог до точності, надійності та автономності їхніх систем управління. Традиційні алгоритми контролю, побудовані на основі фіксованих параметрів, не завжди здатні забезпечити стійкість польоту в умовах зовнішніх збурень, зміни масо-габаритних характеристик або зношування обладнання. У зв'язку з цим усе більшого поширення набувають системи адаптивного управління, що дозволяють автоматично змінювати параметри регулятора залежно від поточного стану об'єкта. Побудова таких систем спирається на використання математичного моделювання, яке забезпечує формалізоване представлення динаміки польоту та дозволяє досліджувати поведінку апарата у віртуальному середовищі до етапу практичної реалізації.

Математичні моделі БПЛА можуть бути лінійними або нелінійними залежно від складності об'єкта та умов експлуатації. Найпоширенішим підходом є використання рівнянь у просторах станів, які описують взаємозв'язок між положенням, швидкістю, кутовими координатами та керуючими сигналами. Для адаптивного управління важливо включати до моделі не тільки основні динамічні рівняння, але й можливі невизначеності, наприклад, зміну маси при витраті пального або вплив поривів вітру. На основі таких моделей здійснюється синтез алгоритмів, здатних оцінювати поточні параметри системи та підлаштовуватися під них у режимі реального часу.

Одним із найбільш поширених методів адаптивного управління є модельно-орієнтоване управління з ідентифікацією параметрів (Model Reference Adaptive Control, MRAC). У цьому підході задається бажана модель поведінки системи, а регулятор змінює свої коефіцієнти таким чином, щоб фактичний вихід БПЛА якомога точніше відповідав еталонному. Іншим підходом є

управління з підвищеною стійкістю до збурень, що передбачає синтез регуляторів, здатних ефективно функціонувати за широкого діапазону невизначеностей без потреби в їхній точній компенсації. Обидва методи активно застосовуються під час проєктування систем стабілізації висоти та орієнтації дронів.

Важливим етапом розробки адаптивної системи управління є попереднє тестування на основі комп'ютерного моделювання. За допомогою середовищ MATLAB/Simulink, Gazebo або Python-бібліотек можна створити цифровий двійник БПЛА та перевірити алгоритми в різних сценаріях польоту: при поривах вітру, відмові сенсорів або затримках у передаванні сигналів. Такий підхід дає змогу виявити потенційні проблеми без ризику пошкодження реального обладнання. Крім того, результати моделювання слугують підґрунтям для подальшого налаштування системи управління вже на етапі натурних випробувань.

Застосування адаптивного управління на основі математичного моделювання дозволяє значно підвищити ефективність роботи БПЛА. Зокрема, покращується точність стабілізації, зменшується час перехідних процесів, підвищується здатність системи працювати в умовах непередбачуваних змін зовнішнього середовища. У перспективі такі технології можуть стати основою для створення повністю автономних літальних систем, здатних приймати рішення без участі оператора.

Отже, математичне моделювання є ключовим інструментом у процесі розробки адаптивних систем управління польотом БПЛА. Воно забезпечує можливість попереднього аналізу динаміки польоту, синтезу алгоритмів управління та їхньої перевірки у віртуальному середовищі. Поєднання адаптивного управління з підходами, орієнтованими на стійкість до збурень, відкриває нові можливості для підвищення надійності безпілотних систем, що робить їх придатними для використання у військових, цивільних та промислових застосуваннях. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення інтегрованих систем управління, які поєднуюватимуть алгоритми штучного інтелекту з класичними методами керування.

Список використаних джерел:

1. Астр'юм К. Дж., Віттенмарк Б. Адаптивне керування. – Пер. з англ. – Київ: Наукова думка, 2010. – 576 с.
2. Беард Р. В., Мак-Лейн Т. В. Малі безпілотні літальні апарати: теорія і практика. – Пер. з англ. – Харків: Аерокосмічне видавництво, 2015. – 445 с.
3. Хавер Г. Основи теорії автоматичного керування. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 412 с.
4. Сіренко С. І., Коваленко В. В. Системи керування безпілотними літальними апаратами: моделювання та стабілізація // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Приладобудування. – 2021. – № 64. – С. 45–52.
5. Бойко І. М. Математичне моделювання динаміки квадрокоптера в умовах збурень // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2020. – № 3(61). – С. 12–18.
6. Соколов А. П. Адаптивні алгоритми керування для авіаційних систем // Наукові вісті НАУ. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 25–31. Відомості про авторів:

Древенчук Роман Васильович – Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, викладач кафедри №203, Харків, Україна; email: mailboy2009@gmail.com

Зубарева Анастасія Олександрівна – Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, слухач 262С навчальної групи, Харків, Україна; email: nastazubareva251@gmail.com

Бойко Валерія Віталіївна – Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, слухач 262С навчальної групи, Харків, Україна; email: eugenii4454039@gmail.com

Zubareva Anastasiia Oleksandrivna - Kharkiv National Air Force University named after I. Kozhedub, student of 262C training group, Kharkiv, Ukraine; email: nastazubareva251@gmail.com

Boiko Valeriia Vitaliivna - Kharkiv National Air Force University named after I.

Kozhedub, student of 262C training group, Kharkiv, Ukraine; email: eugenii4454039@gmail.com

Drevenchuk Roman Vasylovych – *Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, lecturer, department No. 203, Kharkiv, Ukraine; email: mailboy2009@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8935-0923>*