

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ
АПАРАТАМИ НА ОСНОВІ ГЛИБИННОГО НАВЧАННЯ**

Салєєв В. О., Мартовицький В.О.

vladyslav.salieiev@nure.ua, vitalii.martovytskyi@nure.ua

Науковий керівник – доц., к.т.н., Мартовицький В.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. ЕОМ
м. Харків, Україна

The paper is devoted to the development and analysis of an unmanned aerial vehicle (UAV) control system based on deep learning methods. Modern UAV applications require high levels of autonomy, adaptability, and reliability in complex and dynamic environments where traditional control approaches may be insufficient. The proposed approach integrates deep neural networks into key components of the control system, including perception, localization, trajectory planning, and decision-making. Particular attention is paid to the use of computer vision techniques and deep reinforcement learning for autonomous navigation and obstacle avoidance. The advantages of deep learning-based control systems, such as the ability to process unstructured data and adapt to changing conditions, are discussed. At the same time, challenges related to computational complexity, data requirements, and real-world deployment are analyzed. The study demonstrates that combining deep learning methods with classical control algorithms can significantly improve the performance and autonomy of UAV systems. The results highlight the перспективність of intelligent control systems for future aerospace and robotics applications.

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів характеризується зростанням вимог до автономності, точності навігації, стійкості керування та здатності працювати в складних і динамічних середовищах. Традиційні підходи до побудови систем керування БПЛА, що ґрунтуються на класичних алгоритмах регулювання та наперед визначених моделях середовища, часто виявляються недостатньо гнучкими в умовах неповної інформації, наявності перешкод, змін освітлення, погодних факторів або відмови супутникової навігації. У зв'язку з цим особливого значення набуває використання методів глибинного навчання, які дають змогу формувати адаптивні системи керування, здатні аналізувати великі обсяги сенсорних даних та приймати рішення в реальному часі. Сучасні огляди показують швидке зростання кількості досліджень, пов'язаних із використанням глибинного навчання та комп'ютерного зору для автономної навігації БПЛА. Зокрема, у статті [1] відзначено активне застосування таких підходів у задачах навігації, посадки, спостереження, пошуку та рятування.

Метою роботи є дослідження принципів побудови системи керування безпілотним літальним апаратом на основі глибинного навчання, а також аналіз основних компонентів такої системи. Подібна система зазвичай

поєднує бортові сенсори, обчислювальний модуль, алгоритми сприйняття навколишнього середовища, модулі оцінювання стану апарата, планування траєкторії та формування керувальних впливів. На відміну від класичних підходів, де значна частина логіки задається вручну, у системах на основі глибинного навчання важливі функції можуть реалізовуватися через нейронні мережі, які навчаються на даних. Це дозволяє підвищити адаптивність системи до нових умов експлуатації та зменшити залежність від точних аналітичних моделей середовища [2].

Одним із ключових елементів системи керування БПЛА є модуль сприйняття середовища. Для цього використовуються дані з камер, інерціальних вимірювальних модулів, лідарів, датчиків глибини, супутникових приймачів та інших джерел. Глибинне навчання дає змогу ефективно обробляти такі дані, виконуючи виявлення об'єктів, сегментацію сцени, оцінювання положення апарата та розпізнавання небезпечних зон. Значну роль відіграють згорткові нейронні мережі, які застосовуються для обробки зображень і побудови візуальної навігації. У сучасних роботах окремо підкреслюється важливість глибинного навчання для задач абсолютної візуальної локалізації БПЛА, особливо в умовах, де сигнал GNSS є нестабільним або недоступним [3]. Такі підходи забезпечують точніше оцінювання положення апарата порівняно з багатьма традиційними методами, що базуються лише на класичних візуальних ознаках.

Після етапу сприйняття середовища важливим завданням є побудова траєкторії руху та формування керувальних дій. У цій сфері активно застосовується глибинне підкріплювальне навчання, яке дозволяє БПЛА навчатися ефективної поведінки через взаємодію із середовищем. Перевагою такого підходу є можливість врахування складної динаміки польоту, наявності обмежень та змінних умов руху. Сучасні дослідження демонструють, що поєднання глибинного підкріплювального навчання з методами адаптивного нелінійного прогнозного керування дає змогу підвищити точність відстеження траєкторії, швидкість реакції системи та стійкість у складних динамічних середовищах. Таким чином, нейронна мережа може використовуватися не лише для сприйняття сцени, але й для оптимізації керування польотом [4].

Важливим напрямом є також реалізація автономного обходу перешкод. Для безпечного руху БПЛА в реальному середовищі недостатньо лише визначити цільову траєкторію - необхідно постійно коригувати її відповідно до змін обстановки. У сучасних роботах для цього поєднують глибинне підкріплювальне навчання з багатосенсорним сприйняттям, зокрема із використанням лідара та камер глибини. Такий підхід дозволяє будувати більш надійні системи автономної навігації, здатні враховувати геометрію сцени та приймати рішення щодо уникнення перешкод у реальному часі. Це особливо важливо для польотів у міських умовах, у приміщеннях або в зонах зі складною структурою простору [5].

Окрему увагу під час побудови систем керування БПЛА на основі глибинного навчання слід приділяти задачі переходу від моделювання до реального застосування. Більшість моделей навчається у симуляторах, де можна безпечно відпрацьовувати різні сценарії польоту та накопичувати навчальні дані. Проте у реальних умовах система стикається з шумами сенсорів, затримками, вітровими збуреннями, апаратними обмеженнями та іншими факторами, які складно повністю відтворити в симуляції. Практичні дослідження показують, що навіть за наявності високих результатів у віртуальному середовищі реальна імплементація потребує додаткової адаптації моделей, зменшення складності нейронних мереж і врахування обчислювальних ресурсів бортового обладнання. Разом із тим уже продемонстровано можливість реального впровадження окремих елементів глибинного керування на мініквадрокоптерах, що підтверджує перспективність такого підходу.

Ще одним важливим аспектом є інтеграція візуальної навігації та керування в єдину інтелектуальну систему. У сучасних прикладних дослідженнях, зокрема в задачах пошуку та рятування, використовуються архітектури, де нейронні мережі виконують візуальне виявлення та оцінювання положення об'єктів, а алгоритми підкріплювального навчання формують стратегію керування рухом. Таке поєднання дає змогу підвищити ефективність роботи автономних систем у складних умовах, де важливими є як точність сприйняття, так і стійкість прийняття рішень. Прикладом є системи кооперації безпілотних повітряних та надводних апаратів, у яких глибинні моделі забезпечують візуальну навігацію, а навчальні алгоритми - адаптивне керування в умовах зовнішніх збурень.

Перевагами систем керування БПЛА на основі глибинного навчання є здатність працювати з неструктурованими даними, адаптуватися до нових умов, автоматично виділяти інформативні ознаки та підвищувати рівень автономності безпілотного апарата. Такі системи можуть ефективно застосовуватися для інспекції інфраструктури, моніторингу територій, доставки вантажів, виконання рятувальних операцій та польотів у середовищах, де класичні алгоритми працюють нестабільно. Водночас існують і суттєві обмеження. До них належать потреба у великих обсягах навчальних даних, значні обчислювальні витрати, складність пояснення рішень нейронних мереж, а також проблема гарантованої безпеки в критичних режимах польоту. Огляди останніх років підкреслюють, що саме обмежена узагальнювальна здатність моделей та складність перенесення рішень із симуляції в реальний світ залишаються одними з головних викликів у цій галузі.

Отже, система керування безпілотними літальними апаратами на основі глибинного навчання є перспективним напрямом розвитку сучасної авіаційної та робототехнічної техніки. Поєднання методів комп'ютерного зору, глибинних нейронних мереж, підкріплювального навчання та

класичних контурів стабілізації дозволяє створювати адаптивні та інтелектуальні системи керування, здатні працювати в умовах невизначеності. Особливе значення такі підходи мають для автономної навігації, візуальної локалізації, уникнення перешкод і відстеження траєкторії. Подальший розвиток цієї галузі пов'язаний із підвищенням надійності моделей, зменшенням їх ресурсомісткості, удосконаленням механізмів перенесення з моделювання у реальне середовище та створенням безпечних архітектур прийняття рішень для практичного застосування БПЛА.

Список використаних джерел:

1. atkuri A. V. R., Madan H., Khatri N., Abdul-Qawy A. S. H., Patnaik K. S. Autonomous UAV navigation using deep learning-based computer vision frameworks: A systematic literature review // *Array*. 2024. Vol. 23. Art. 100361. DOI: 10.1016/j.array.2024.100361.
2. Couturier A., Akhloufi M. A. A Review on Deep Learning for UAV Absolute Visual Localization // *Drones*. 2024. Vol. 8, No. 11. Art. 622. DOI: 10.3390/drones8110622
3. Wang Y., Liu W., Liu J., Sun C. Cooperative USV–UAV marine search and rescue with visual navigation and reinforcement learning-based control // *ISA Transactions*. 2023. Vol. 137. P. 222–235. DOI: 10.1016/j.isatra.2023.01.007
4. Trad T. Y., Choutri K., Lagha M., Meshoul S., Khenfri F., Fareh R., Shaiba H. Real-Time Implementation of Quadrotor UAV Control System Based on a Deep Reinforcement Learning Approach // *Computers, Materials & Continua*. 2024. Vol. 81, No. 3. P. 4757–4786. DOI: 10.32604/cmc.2024.055634
5. Shi J., Zhou S., Man X., Li C., Guo F. Trajectory planning and tracking for UAVs with deep reinforcement learning and adaptive nonlinear MPC // *Expert Systems with Applications*. 2025. Vol. 288. Art. 127765