

Ю. В. Іваненко, О. С. Ляшенко, Т. В. Філімончук

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ОГЛЯД МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

**Анотація. Актуальність.** Протягом останніх десятиліть зі стрімким розвитком комп'ютерних технологій та технологій автоматичного управління, дослідження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) привернули до себе велику увагу з усього світу. Зокрема, через попит на різні цивільні застосування, концептуальний дизайн БПЛА і технології автономного управління польотами взаємно просуваються і розвиваються. **Метою даної роботи** є структурування методів керування безпілотними літальними апаратами та дослідження їх принципів роботи. **Об'єктом дослідження** є процес керування БПЛА, архітектура та програмне забезпечення цих апаратів. **Предметом дослідження** є методи керування безпілотними літальними апаратами. **Результати.** У даній роботі проведено аналіз питань керування БПЛА, включаючи математичну модель квадрокоптера та різні підходи до керування. Проілюстровано та обговорено основні ідеї, умови використання, переваги та недоліки цих методів. Розглядаються майбутні напрямки досліджень в цій галузі. **Висновок.** Визначені методи керування та їх архітектурні складові планується використовувати при розробці дрона для цивільних потреб та подальших досліджень у цій сфері.

**Ключові слова:** методи керування, безпілотний літальний апарат, пілотажний метод, навігаційний метод, автоматичний метод.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Технологічні інновації призвели до появи безпілотних літальних апаратів. БПЛА – це літальний апарат, який може літати без людини-пілота на борту.

За останні роки популярність БПЛА надзвичайно зросла. Крім того, вже більше десяти років спостерігається збільшення кількості нових застосувань цих апаратів. Спочатку БПЛА використовувалися для військової розвідки, спостереження, збору розвідувальної інформації та захоплення цілей. Проте, розвиток глобальної системи позиціонування (GPS), електроніки, двигунів і мікроконтролерів спонукав виробників створювати легші і дешевші дрони. Тепер дрони широко використовуються для багатьох невійськових цілей, таких як оцінка врожаю, дослідження клімату та навколишнього середовища, надання першої медичної допомоги, туризм, моніторинг дорожнього руху і погодних умов тощо [2].

Багато дослідників працювали над побудовою БПЛА, які працюють автономно. Розвиток автономних польотів призвів до прориву в теорії управління і зробив величезний внесок у літературу. З роками квадрокоптери стали важливою платформою для досліджень і розробок БПЛА [3]. Система керування польотом є фундаментальним аспектом квадрокоптера. Крім того, проблеми, які необхідно враховувати при дослідженні конструкції системи керування квадрокоптера – це складні нелінійні динамічні рівняння руху, багато входні-багато вихідні характеристики динамічних рівнянь, зв'язані підсистеми, динамічні невизначеності, вітрові збурення і т.п. [4]. Таким чином для покращення характеристик при побудові БПЛА потрібно чітко орієнтуватися в архітектурі та в методах керування, які можна застосувати до таких апаратів. Ця оглядова стаття підсумовує останні стратегії управління, що застосовуються до БПЛА.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання керування безпілотними літальними апаратами часто розглядається дослідниками. Робіт і досліджень багато [1-16]. У роботах автори розглядають

методи основані на лінійні квадратичні регуляторах, пропорційно-інтегральних похідних, регуляторах з ковзним режимом та ін. Для простішого розуміння виникає необхідність упорядкувати цю інформацію в загальну стратегію управління. Тому виникає потреба проаналізувати та структурувати базові питання методів керування БПЛА.

**Метою цієї роботи** є проведення аналізу різних методів керування БПЛА та дослідження принципу їх роботи і використання, ґрунтуючись на архітектурі таких апаратів.

### Основна частина

Архітектура побудови безпілотних літальних апаратів може бути різною, залежно від вимог і поставлених завдань.

Як показує досвід розроблення безпілотних літальних апаратів, у контексті керування БПЛА існують два основні елементи. Перший – виконавчий, тобто це сам планер із силовою установкою і рульовим механізмом. Другий – командний. Це той елемент, який ставить завдання на політ, ухвалює рішення, якщо є необхідність змінити програму польоту, виконує корекцію руху літального апарата в разі його відхилення від заданої траєкторії руху [4].

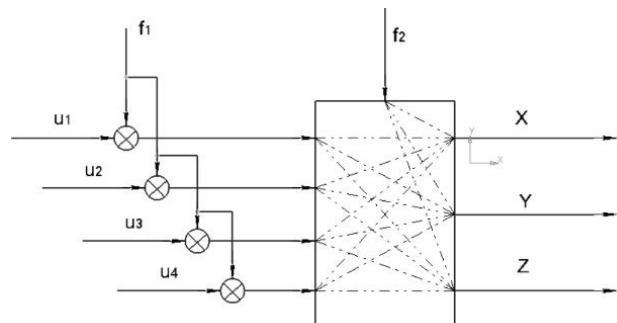


Рис. 1. Структурна схема дрона, як об'єкта керування

Під час побудови комплексу управління БПЛА командний елемент або його частина виноситься за межі апарата і зв'язується з виконавчим елементом лінійною передачею.

Найбільші труднощі виникають під час розроблення системи керування. Це пов'язано з тим, що БПЛА повинен виконувати завдання в умовах автономного польоту, отже, мати повну функціонально замкнуту систему керування (СК). У зв'язку з цим СК повинна вирішувати такі завдання:

- стабілізація параметрів руху об'єкта відносно зовнішніх перешкод різної природи;
- аналіз зовнішніх даних бортовими засобами і визначення пріоритетної мети залежно від поставленого перед БПЛА завдання;
- розрахунок оптимальної траєкторії руху з метою зменшення часу руху і витрати ресурсів БПЛА;
- контроль правильності утримання траєкторії;
- забезпечення відмовостійкості об'єкта управління або компенсація змін його характеристик бортовими засобами;
- виконання обчислювальних операцій великого обсягу в реальному масштабі часу для реалізації алгоритмів керування БПЛА [3].

Слід підкреслити, що основною функцією, яку розв'язує СК, є керування рухом центру мас (три канали керування) і кутовими рухами БПЛА щодо центру мас (три канали керування).

Для того, щоб наочно описати рух моделі квадрокоптера, необхідно вибрати координати положення. Модель квадрокоптера в цій роботі задається каркасом корпусу  $B$  і землею  $E$ , як показано на рис. 2. Нехай вектор  $[x, y, z]'$  позначає положення центру ваги квадрокоптера, а вектор  $[u, v, w]'$  – лінійну швидкість у системі координат. Вектор  $[p, q, r]'$  – кутова швидкість квадрокоптера,  $m$  – загальна маса,  $g$  – прискорення сили тяжіння,  $l$  – відстань від центру кожного ротора до центру гравітації [7].

Якщо не потрібно точно витримувати рух літального апарата за заданою траєкторією, то керують тільки його кутовими рухами.

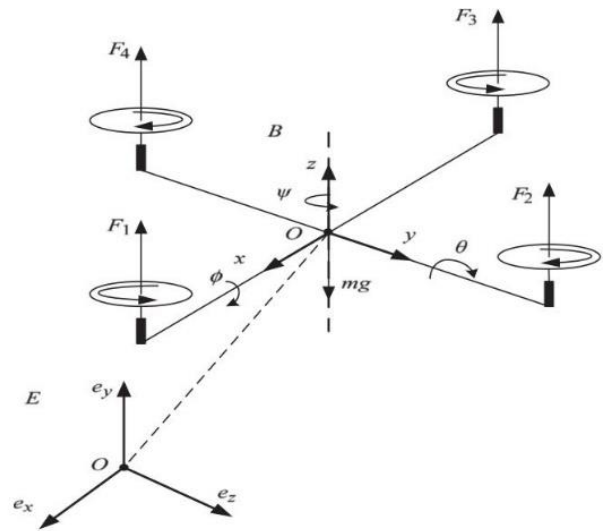


Рис. 2. Базова модель квадрокоптера [7]

Управління кутовими рухами забезпечує цілком певне положення БПЛА в просторі щодо вектора швидкості центру мас. Управління рухом центру мас забезпечує політ за найкращою (оптимальною) траєкторією, наприклад, за найкоротшим шляхом за найкоротший час.

Таким чином, управління польотом БПЛА зводиться до управління параметрами його руху: кутовими координатами, кутовими швидкостями і прискореннями, лінійними координатами (дальністю, висотою, бічним переміщенням) тощо.

Існуючі СК поділяють на автономні та неавтономні. Крім того, в окрему групу можуть бути виділені комбіновані СК [5].

Особливістю автономних є те, що сигнали керування рухом виробляються апаратурою, повністю розташованою на борту, причому ця апаратура після запуску не отримує жодної інформації з пункту керування. Автономні СК діють за заздалегідь визначеною програмою.



Рис. 3. Приклад наземного пункту керування [3]

Під час використання автономних систем існує два методи отримання керівних сигналів. Можна заздалегідь перед стартом розрахувати, як мають змінюватися в часі основні параметри руху БПЛА (швидкість, кут тощо), що визначають траєкторію руху.

Отримані функції часу вводяться в спеціальні пристрої СК як задані величини або програми.

Після старту в процесі польоту БПЛА відповідними пристроями безперервно змінюються поточні (дійсні) значення зазначених параметрів. СК здійс-

ноє порівняння розрахункових значень параметрів із поточними значеннями і в разі їх нерівності виробляє відповідні сигнали керування.

Якщо на БПЛА встановлено апаратуру, що дає змогу вести безперервне вимірювання її координат у просторі, то автономне керування можна здійснити по-іншому. Координати, одержані від апаратури, автоматично вводяться в бортовий обчислювальний пристрій, який відповідно до заздалегідь закладеної програми обчислює величину сигналів управління. Отже, заздалегідь не задається певна траєкторія, а щоразу обчислюється залежно від поточних координат. При цьому передбачається, що координати об'єкта попередньо закладені в обчислювальний пристрій. На роботу таких СК не впливають штучно створені перешкоди. Це основна їхня перевага. Крім того, ці системи можна застосовувати для керування БПЛА з великою дальністю польоту [8].

Визначення власних координат повітряним судном відбувається щомиті за стандартної роботи приймача супутникової навігаційної системи (СНС). Під час перенаштування приймача частота визначення власних координат може бути збільшена. Практично збільшення частоти не дає виразу в точності визначення координат, оскільки швидкість зміни координат накладає обмеження на маневре-

ність БПЛА. Характер руху протягом однієї секунди змінюється мало, і положення БПЛА можна досить точно розрахувати за його попереднім положенням, динамікою польоту і поточним маневром. У реальності стоїть завдання не тільки знати, де і в який час перебуває об'єкт, а й залежно від його місця розташування виробити відповідну реакцію.

Отже, ситуацію можна поділити на три умовні категорії. Перша – найпростіший випадок моніторингу. Завдання системи полягає у фіксації місця розташування об'єкта з прив'язкою до часу. Друга – це розширення першої. Причому, на додаток до спостереження, система виробляє всередині себе відповідну реакцію (сигналізацію, набір обчислювальних процедур, вироблення внутрішньої команди). У цьому випадку час на вироблення відповідної реакції і на її виконання мізерно малий порівняно з дискретністю відліку місця розташування об'єкта. Третя категорія – передача обчислених у другому випадку даних назад на борт літального апарата. Наприклад, з метою корекції його руху. А даному випадку враховуються час передавання координат із літального апарата на пункт спостереження, вироблення команди і передавання команди назад на борт апарата.

Одним із методів керування БПЛА є пілотажний (рис. 4).

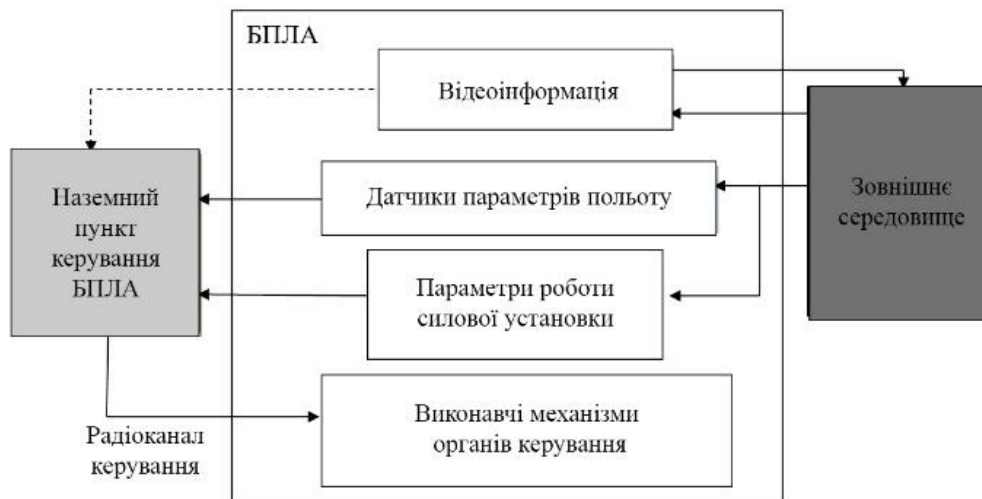


Рис. 4. Структура пілотажного методу керування БПЛА

У цій ситуації управління виконується безпосередньо виконавчими механізмами планера. З пункту управління передаються задані кути відхилення рульових аеродинамічних площин і режими роботи силової установки. Для БПЛА з високошвидкісними характеристиками і високою маневреністю потрібне дуже швидке доставлення команд управління з пункту керування на борт. Одночасно з цим пілотажне управління вимагає високого ступеня втручання оператора в процес управління літальним апаратом, що, своєю чергою, вимагає високої концентрації оператора, а також високого ступеня підготовки [8].

Наступний метод керування називається навігаційним (рис. 5).

Керування БПЛА здійснюється не передачею йому команд для виконання маневрів, а шляхом

завдання точок маршруту щодо земної поверхні. Цей спосіб керування вимагає перенесення частини обчислень із пункту керування на борт БПЛА.

Усі обчислення з виявлення відхилень у русі від заданої траєкторії виконуються вже на борту. Відповідно, ще більше знімається навантаження з радіолінії. По ній передаються тільки зміни навігаційної програми (зміна маршруту руху щодо раніше запланованого). У цьому разі в разі виникнення будь-яких відхилень від заданої траєкторії навігаційний обчислювач здатний сам, без участі зовнішнього пункту управління, виробити набір команд для корекції руху.

Однак таке керування підвищує вимоги до апаратури навігаційного обчислювача (до пам'яті, продуктивності та програмного забезпечення).

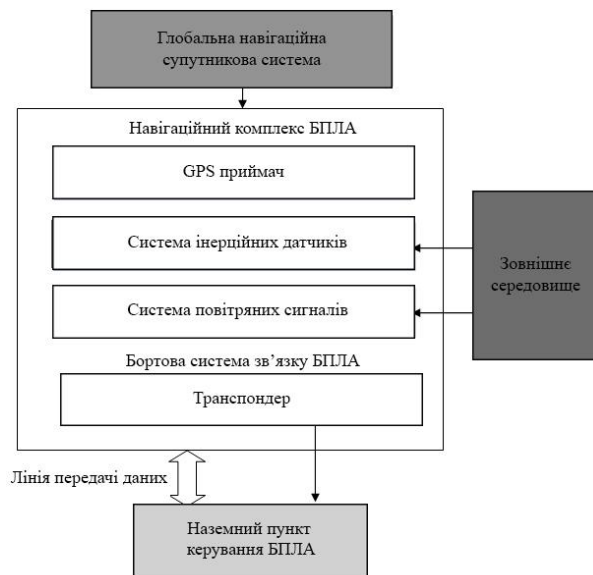


Рис. 5. Структура навігаційного методу керування БПЛА

У такому разі до складу бортового комплексу навігації та керування мають входити:

- приймач супутникової навігації, що забезпечує приймання навігаційної інформації від системи GPS;

- система інерціальних датчиків, що забезпечує визначення орієнтації та параметрів руху БПЛА;

- система повітряних сигналів, що забезпечує вимірювання висоти і повітряної швидкості;

- апаратура лінії передачі даних, різні види антен, призначені для виконання завдань.

Бортова система навігації та управління забезпечує:

- політ за заданим маршрутом (завдання маршруту проводиться із зазначенням координат і висоти поворотних пунктів маршруту);

- зміну маршрутного завдання або повернення в точку старту за командою з наземного пункту управління;

- обліг зазначеної точки;

- автосупровід обраного об'єкта;

- стабілізацію кутів орієнтації БПЛА;

- підтримання заданих висот і швидкості польоту (шляхової або повітряної);

- збір і передачу телеметричної інформації про параметри польоту і роботу цільового обладнання;

- програмне управління пристроями цільового обладнання.

Бортова система зв'язку:

- функціонує в дозволеному діапазоні радіочастот;

- забезпечує передавання даних з борту на землю і з землі на борт.

Дані, що передаються з борту на землю:

- параметри телеметрії;

- потокове відео- і фотозображення.

Дані, що передаються на борт, містять:

- команди керування БПЛА;

- команди керування цільовою апаратурою.

Інформацію, отриману з БПЛА, потрібно класифікувати залежно від ступеня загрози. Класифікація

проводиться оператором, або безпосередньо бортовим комп'ютером (автопілотом) БПЛА. У другому випадку програмне забезпечення комплексу містить елементи штучного інтелекту, і потрібно виробити кількісні критерії та градації рівнів загрози. Такі критерії можуть бути сформульовані шляхом експертних оцінок і формалізовані таким чином, щоб мінімізувати ймовірність помилкового сигналу тривоги [9].

Третій метод управління БПЛА – це автоматичний (рис. 6).

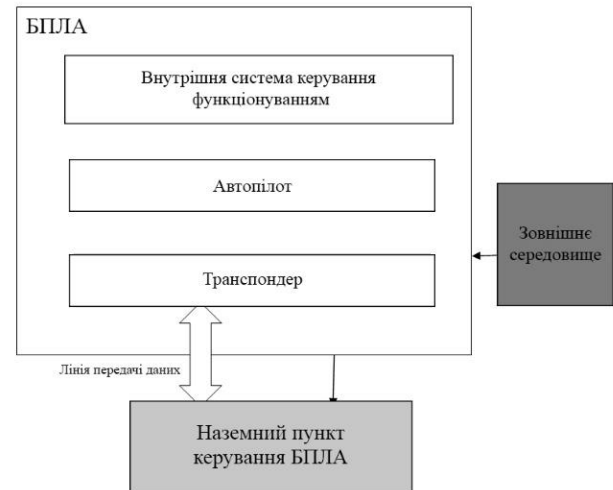


Рис. 6. Структура автоматичного методу керування БПЛА

Для його використання має бути створена внутрішня система управління функціонуванням БПЛА. Вона призначена для реалізації алгоритмів функціонування внутрішніх систем і пристроїв літального апарата для досягнення мети завдання і фактично реалізує локальні функції управління в повітряному просторі.

## Висновки

Останнім часом застосування БПЛА у військовому та цивільних секторах стрімко зростає завдяки їх гнучкості та універсальності. Тим не менш, під час польоту або виконання завдань виникають певні проблеми, які необхідно враховувати і вирішувати. Ці проблеми включають динамічні невизначеності, збурення навколишнього середовища, недостатнє спрацьовування і сильно пов'язану нелінійну динамічну модель. Як наслідок, розробка ефективних і надійних механізмів керування для динамічної системи квадрокоптера є критично важливою.

У цій роботі обговорюється огляд різних підходів до керування, що застосовуються для БПЛА. Методи керування мають свої унікальні переваги, обмеження та алгоритми.

Визначені методи керування та їх архітектурні складові планується використовувати при майбутній розробці БПЛА для цивільних потреб та подальших досліджень у цій сфері.

Практичність базових методів управління польотом збільшила очікування людей щодо їхнього використання в більш суспільних сферах і цивільному повітряному просторі. З одного боку, БПЛА можуть запропонувати величезний потенціал для застосування в міському середовищі – від моніторингу інфраструк-

тури до спостереження за дорожнім рухом, реагування на надзвичайні ситуації і доставки медичного вантажу. З іншого боку, складність і різноманітність завдань, а також невизначеність умов експлуатації ставлять додаткові вимоги до автономності, інтелекту і безпеки систем БПЛА, які можуть бути недосяжними для існуючих методів управління польотами.

Нещодавні досягнення в галузі машинного навчання і методів на основі даних, а також нові можливості зондування і сприйняття, що з'являються в робототехніці, вказують на перспективний технічний шлях до створення більш автономних і інтелектуальних систем БПЛА, дозволяючи їм вчитися на власному досвіді і сприймати навколишнє середовище.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. P. Liu, A. Y. Chen, Y. Huang, J. Han, J. L., Shih-Chung Kang, T. Wu, M. Wen, M. Tsai (2014), "A review of rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering", *Smart Structures and Systems*, – 2014. – С. 1065–1094, doi: <http://dx.doi.org/10.12989/sss.2014.13.6.1065>.
2. Muhammad Maaruf, Magdi Sadek Mahmoud, Alfian Ma'arif (2022), "A Survey of Control Methods for Quadrotor UAV", *International Journal of Robotics and Control Systems* Vol. 2, No. 4, 2022, pp. 652-665, available at: <https://pubs2.ascee.org/index.php/ijrcs>.
3. Z. Li, X. Ma, and Y. Li, "Robust trajectory tracking control for a quadrotor subject to disturbances and model uncertainties," *International Journal of Systems Science*, vol. 51, no. 5, pp. 839–851, 2020, <https://doi.org/10.1080/00207721.2020.1746430>.
4. Z. Zuo, C. J. Liu, Q.-L. Han, and J. Song (2022), "Unmanned aerial vehicles: Control methods and future challenges", *IEEE/CAA J. Autom. Sinica*, vol. 9, no. 4, pp. 601–614. doi: 10.1109/JAS.2022.105410.
5. O. Mechali, L. Xu, Y. Huang, M. Shi, and X. Xie (2021), "Observer-based fixed-time continuous nonsingular terminal sliding mode control of quadrotor aircraft under uncertainties and disturbances for robust trajectory tracking: Theory and experiment," *Control Engineering Practice*, vol. 111, p. 104806, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104806>.
6. H. Mo and G. Farid (2019), "Nonlinear and adaptive intelligent control techniques for quadrotor uav – a survey", *Asian Journal of Control*, vol. 21, no. 2, pp. 989–1008, doi: <https://doi.org/10.1002/asjc.1758>.
7. J. Xiong, E. Zheng, "Position and attitude tracking control for a quadrotor UAV", *ISA (Instrum Soc Am) Trans*, 53 (3) (2014), pp. 725-731, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.01.004>.
8. B. J. Emran and H. Najjaran (2018), "A review of quadrotor: An underactuated mechanical system," *Annual Reviews in Control*, vol. 46, pp. 165–180, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.10.009>.
9. M. Champion, P. Ranganathan Prakash, S. Faruque (2019), "UAV swarm communication and control architectures: a review", *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, vol. 7, available at: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/juvs-2018-0009>.
10. M. R. Cohen, K. Abdulrahim, and J. R. Forbes, "Finite-horizon lqr control of quadrotors on se2(3)," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 5748–5755, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3010214>.
11. J. Schlagenhauf, P. Hofmeier, T. Bronnenmeyer, R. Paelinck, and M. Diehl, "Cascaded nonlinear mpc for realtime quadrotor position tracking," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 7026–7032, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.444>.
12. C.-C. Chen and Y.-T. Chen, "Feedback linearized optimal control design for quadrotor with multiperformances," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 26 674–26 695, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3057378>.
13. Z. Hou, P. Lu, and Z. Tu, "Nonsingular terminal sliding mode control for a quadrotor uav with a total rotor failure," *Aerospace Science and Technology*, vol. 98, p. 105716, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.105716>.
14. B. J. Emran and H. Najjaran, "A review of quadrotor: An underactuated mechanical system," *Annual Reviews in Control*, vol. 46, pp. 165–180, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2018.10.009>.
15. Z. Wang and T. Zhao, "Based on robust sliding mode and linear active disturbance rejection control for attitude of quadrotor load uav," *Nonlinear Dynamics*, pp. 3485–3503, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07349-y>.
16. L.-X. Xu, H.-J. Ma, D. Guo, A.-H. Xie, and D.-L. Song, "Backstepping sliding-mode and cascade active disturbance rejection control for a quadrotor uav," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 25, no. 6, pp. 2743–2753, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.2990582>.
17. Martovytskyi V., Ivaniuk O. Approach to Building a Global Mobile Agent Way Based on Q-learning. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020. № 3 (13). P. 43–51. doi: 10.30837/itssi.2020.13.043.

Received (Надійшла) 25.12.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.03.2023

### A SURVEY OF CONTROL METHODS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE

Yuliia Ivanenko, Oleksii Liashenko, Tetiana Filimonchuk

**Abstract. Topicality.** Over the past decades, with the rapid development of computer and automatic control technologies, research on unmanned aerial vehicles (UAVs) has attracted much attention from around the world. In particular, due to the demand for various civilian applications, UAV conceptual design and autonomous flight control technologies are mutually promoted and developed. **The goal of this work** is to structure the methods of controlling unmanned aerial vehicles and study their operating principles. **The object of research** is the process of UAV control, architecture and software of these vehicles. **The subject of research** is the methods of controlling unmanned aerial vehicles. **Results.** This paper analyzes the issues of UAV control, including the mathematical model of a quadrotor and various approaches to control. The main ideas, conditions of use, advantages and disadvantages of these methods are illustrated and discussed. Future directions of research in this area are considered. **Conclusions.** The identified control methods and their architectural components are planned to be used in the development of a drone for civilian needs and further research in this area.

**Keywords:** control methods, unmanned aerial vehicle, manual control method, navigation control method, automatic control method.