УДК 629.05, 004.93

DOI: https://doi.org/10.20535/0203-3771492025334101

Ю. В. Бобков[1], *к.т.н., доцент*, **М. О. Воробйов**[2], *студент*

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СУПРОВОДЖЕННЯ ОРІЄНТИРА ОПТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

Ua Проведений в роботі аналіз існуючих методів оптичного визначення та супроводження об’єктів (класичних, кореляційних, глибокого навчання) показав, що вони не забезпечують необхідну точність і надійність в складних динамічних умовах або виявляються занадто ресурсомісткими для практичного застосування на бортовому обладнанні багатьох типів безпілотних літальних апаратів.

Для підвищення точності та надійності визначення та супроводження об’єкта інтересу (орієнтира) в роботі було запропоновано комплексний метод оптичного наведення, який реалізований у розробленій структурній схемі оптичної системи. Запропонована система поєднує результати: оцінки геометричного положення об’єкта методом аналізу контрольних точок; визначення кінематичних параметрів об’єкта за допомогою модуля обробки оптичного потоку; оптимального оцінювання стану об’єкта фільтром Калмана.

В роботі також розроблений алгоритм роботи системи, що включає етап ініціалізації цільового об’єкта оператором з подальшим переходом до повністю автономного режиму супроводження, що включає захоплення кадру, об-

[1] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*
[2] *КПІ ім. Ігоря Сікорського*

робку оптичного потоку та визначення контрольних точок, фільтрацію Калмана та генерацію керуючих сигналів.

Проведені модельні дослідження підтвердили правильність прийнятих рішень та ефективність роботи при супроводженні рухомого об’єкта, а також можливість реалізації на обмежених апаратних ресурсах бортових систем.

En

The analysis of existing methods of optical object detection and tracking (classical, correlation, deep learning) has shown that they do not provide the required accuracy and reliability in complex dynamic conditions or are too resource-intensive for practical use on the onboard equipment of many types of unmanned aerial vehicles.

To improve the accuracy and reliability of detection and tracking of the object of interest (landmark), a comprehensive method of optical guidance was proposed in this paper, which is implemented in the developed structural scheme of the optical system. The proposed system combines the results of: estimating the geometric position of an object by analyzing control points; determining the kinematic parameters of an object using an optical flow processing module; and optimally estimating the state of an object using a Kalman filter.

In this paper also developed an algorithm for the system, which includes the stage of initialization of the target object by the operator, followed by a fully autonomous tracking mode, including frame capture, optical flow processing and control point detection, Kalman filtering and control signal generation.

The modelling studies confirmed the correctness of the decisions made and the efficiency of the work when tracking a moving object, as well as the possibility of implementing on the on-board systems with limited hardware resources.

Вступ

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стали невід'ємною частиною сучасних технологій, знаходячи широке застосування практично у всіх галузях для вирішення різноманітних задач, наприклад таких як моніторинг інфраструктури, сільське господарство, картографування, пошуково-рятувальні операції, доставка вантажів, військові місії тощо. Ключову роль у багатьох таких задачах відіграють бортові оптичні системи, які забезпечують можливість візуального спостереження, ідентифікації об'єктів, навігації, орієнтації в просторі та інших. Для успішного виконання багатьох місій важливим є визначення (захоплення) та подальше супроводження певних об’єктів, які слугують у якості орієнтирів при виконанні поставленої задачі. Таким чином, підвищення точності та надійності бортової оптичної системи супроводження є ключовим фактором успіху виконання багатьох завдань у складних умовах.

У загальному випадку орієнтири можуть бути як нерухомими, так і рухомими. Перший варіант є частковим випадком другого. Тому у загальному випадку будемо мати на увазі саме рухомий орієнтир.

Для вирішення задач визначення (захоплення) та супроводження об’єктів інтересу, розроблені та застосовуються різноманітні алгоритмічні підходи.

Класичні методи на основі визначення ключових точок, такі як *Scale-Invariant Feature Transform* (*SIFT*), *Speeded Up Robust Features* (*SURF*), *Oriented FAST and Rotated BRIEF* (*ORB*) [1, 2] та оптичного потоку (*Lucas-Kanade*) [3], не потребують значних обчислювальних ресурсів, але їхня надійність знижується при змінах освітлення, розмитті, браку текстури чи значних зміщеннях [1, 3]. Комплексування цих методів з даними інерціальної навігаційної системи (ІНС) дозволяє подолати їхню вразливість до спотворень та різких змін руху БПЛА, тим самим підвищуючи загальну надійність супроводження [4].

Методи супроводження на основі кореляційних фільтрів (*CF*) *Minimum Output Sum of Squared Error* (*MOSSE*) та *Kernelized Correlation Filter* (*KCF*) мають високу швидкодію та невисокі обчислювальні вимоги [5]. Проте їхня чутливість до часткового перекриття чи різких змін параметрів об’єктів обмежує надійність при тривалому супроводженні.

Методи глибокого навчання (*Deep learning, DL*) забезпечують значне підвищення точності та стійкості завдяки вивченню репрезентативних ознак об’єктів [6]. Серед провідних методологій глибокого навчання, що характеризуються високою результативністю у задачах візуального супроводження, виокремлюються: сіамські мережі, які реалізують зіставлення на основі вивченої метрики подібності [5, 7]; архітектури, що використовують трансформерні блоки для покращеного моделювання ознак та контексту; та підходи «супроводження через детектування», що інтегрують етапи детектування об’єктів та їх часової асоціації [8, 9]. Однак їхня висока обчислювальна складність та вимоги до апаратних ресурсів часто унеможливлюють їх практичне впровадження на борту малих БПЛА [1,9].

Зважаючи на обмеження кожного окремого сенсора чи алгоритму, комплексування (об’єднання) даних із різних джерел, переважно візуальних та інерціальних, стає ключовою методологією для підвищення точності та надійності супроводження об'єктів та дозволяє взаємно компенсувати їхні недоліки: ІНС забезпечує інформацію про динаміку руху БПЛА, тоді як візуальні дані дозволяють уточнювати положення орієнтира відносно оточення та коригувати накопичені похибки інерціальних вимірювань, що критично важливо саме для задач точного наведення та стабільного супроводження [1, 4].

Аналіз розглянутих вище підходів, показує, що швидкі класичні та кореляційні методи не завжди забезпечують необхідну стійкість в складних динамічних умовах (зміни освітлення, перекриття, різкі маневри цілі та платформи), тоді як більш робастні методи глибокого навчання часто виявляються занадто ресурсомісткими для практичного застосування на борту багатьох типів БПЛА.

Постановка задачі

Метою роботи є підвищення точності та надійності визначення (захоплення) та супроводження об'єкта інтересу (орієнтира) за допомогою оптичної системи БПЛА в умовах обмежених апаратних ресурсів бортових систем.

Для вирішення цієї задачі, в рамках даної роботи пропонується напівавтономний метод, при якому на першому етапі первинного визначення та захоплення об'єкта інтересу залучається оператор. На другому етапі всі системи БПЛА працюють у повністю автономному режимі.

Розробка структурної схеми оптичної системи

Основними шляхами підвищення точності бортових систем є застосування різноманітних структурно-алгоритмічних методів, що базуються на об'єднанні даних та прогнозуванні стану.

Ефективним методом інтеграції даних і оцінювання стану є математичний апарат стохастичної фільтрації, зокрема фільтр Калмана та його нелінійні розширення (*Extended Kalman Filter, EKF*; *Unscented Kalman Filter, UKF*) [10]. Фільтр Калмана оптимально поєднує прогнози стану системи (на основі динамічної моделі) із вимірюваннями від сенсорів, враховуючи їхні похибки [1, 10]. Це дозволяє отримати згладжену та точнішу оцінку стану об'єкта, а також підвищити стійкість до шумів та нестабільності візуальних даних завдяки етапу прогнозування [4].

Саме такий підхід був застосований для підвищення точності та надійності супроводження об'єкта інтересу і реалізований у розробленій структурній схемі оптичної системи (рис. 1). Система складається з двох основних підсистем: модуля камери та системи підвищення точності та надійності.

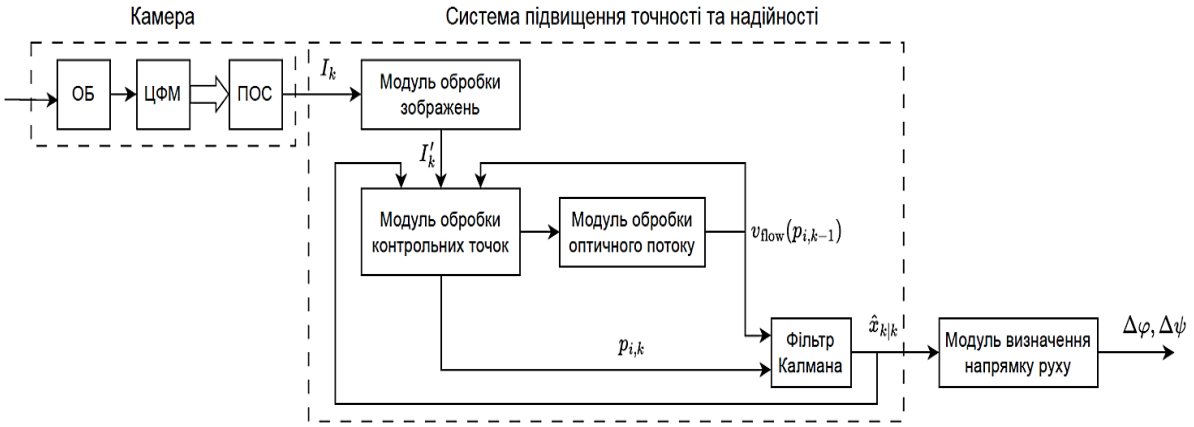

Рис. 1. Структурна схема оптичної системи з підвищеною точністю супроводження об'єкта інтересу (орієнтира)

На першому етапі, який був зазначений вище, оператор обирає область зображення з об'єктом інтересу (орієнтиром), і далі система переходить в автономний режим роботи.

Модуль камери приймає вхідний оптичний сигнал сцени спостереження. Цей модуль включає оптичний блок (ОБ), який фокусує світло та проектує зображення на цифрову фотоматрицю (ЦФМ), де здійснюється оптоелектронне перетворення, а процесор обробки зображення (ПОЗ) формує цифровий відеопотік I_k, придатний для подальшого аналізу.

Далі відеопотік I_k надходить до системи підвищення точності та надійності, де відбувається послідовна обробка даних. Спочатку модуль обробки зображень виконує початкову обробку. Отримане вихідне зображення I'_k подається до модуля обробки контрольних точок (КТ). Для визначення контрольних (ключових) застосовується метод *ORB*.

У модулі обробки КТ визначаються параметри $p_{i,k}$ контрольних точок у межах області інтересу (*Region of interest, ROI*), яку обирає оператор. Модуль обробки оптичного потоку (ОП) аналізує зміщення пікселів об'єкта (орієнтира) та формує їх поле швидкостей u_{flow}.

Дані про положення КТ $p_{i,k}$ та поле швидкостей u_{flow} надходять до фільтра Калмана (*KF*), який використовує алгоритм оптимальної стохастичної фільтрації та комплексує інформацію з модулів з динамічною моделлю руху об'єкта (орієнтира) для обчислення оптимальної скоригованої оцінки вектора стану $\hat{x}_{k|k}$.

Важливою особливістю системи є використання зворотних зв'язків. Зокрема, дані про поле швидкостей u_{flow} та відфільтрована оцінка стану цілі $\hat{x}_{k|k}$ застосовуються для валідації даних у модулі контрольних точок. Ця інформація використовується на наступному кроці обробки для уточнення області інтересу та покращення прогнозування положення візуальних ознак об'єкта, що підвищує стабільність системи.

Зрештою, оцінений стан об'єкта $\hat{x}_{k|k}$ використовується модулем визначення напрямку руху для обчислення помилки відстеження та генерування керуючих сигналів у вигляді кутових поправок по кутах тангажу ($\Delta\varphi$) та рискання ($\Delta\psi$), які передаються до системи керування БПЛА для забезпечення точності та надійності утримання та супроводження об'єкта.

Розробка алгоритму роботи оптичної системи

Алгоритм функціонування розробленої системи підвищеної точності супроводження об'єкта інтересу (орієнтира) представлено у вигляді блок-схеми на рис. 2. Робота системи передбачає два основні етапи: підготовчий етап з участю оператора та етап автономного супроводження.

На підготовчому етапі виконується ініціалізація бортових систем БПЛА та здійснюється політ в область виконання завдання під керуванням оператора або за попередньо визначеним маршрутом.

Після прибуття у заданий район оператор виконує візуальну ідентифікацію об'єкта інтересу (орієнтира) та здійснює його первинне захоплення шляхом наведення камери та подання відповідної команди системі. На цьому етапі фіксуються початкові параметри об'єкта, необхідні для запуску автономного режиму.

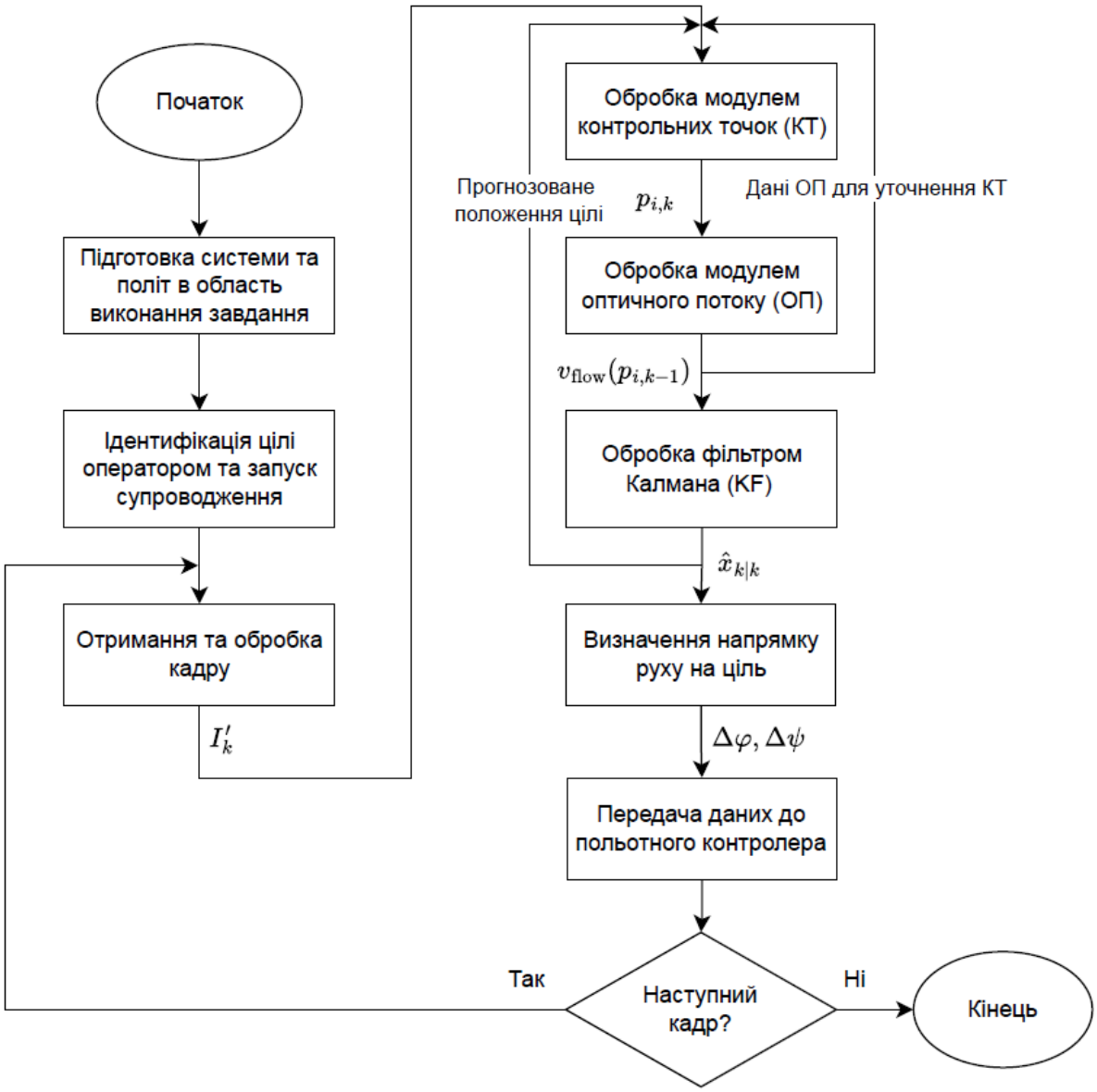

Рис. 2. Алгоритм роботи оптичної системи підвищеної точності

Етап автономного супроводження реалізується у вигляді ітераційного циклу обробки послідовних кадрів відеопотоку. Кожна ітерація починається із отримання нового кадру з модуля камери та його первинної обробки, включаючи визначення або уточнення області інтересу на основі даних зворотного зв'язку. Далі виконується аналіз локальних ознак в області ін-

тересу модулем контрольних точок для оцінки геометричного зміщення об’єкта, враховуючи також дані зворотного зв’язку.

На наступному кроці модуль оптичного потоку оцінює кінематичні параметри руху цілі (поле швидкостей) в уточненій області інтересу, використовуючи результати роботи модуля контрольних точок. Отримана візуальна інформація обробляється фільтром Калмана, який здійснює оптимальну оцінку вектору стану об’єкта інтересу (його координат та швидкостей) шляхом стохастичної фільтрації.

Потім, на основі оцінки вектору стану, модуль визначення напрямку руху розраховує помилку відстеження положення об’єкта та генерує керуючі кутові поправки ($\Delta\varphi$, $\Delta\psi$), які передаються до польотного контролера.

Цикл повторюється для кожного наступного кадру до виконання умови завершення (наприклад, досягнення зони об’єкта інтересу, команда оператора, втрата об’єкта інтересу).

Важливу роль відіграють зворотні зв'язки, що підвищують загальну надійність та точність супроводження. По-перше, відфільтрована оцінка стану з фільтром Калмана використовується для передбачення положення об’єкта на наступному кроці, що дозволяє модулю КТ ефективніше локалізувати область пошуку контрольних точок.

По-друге, валідація та уточнення набору контрольних точок у модулі КТ відбуваються шляхом періодичної перевірки за методом ORB (порівняння поточних ознак об’єкта з еталонними), що забезпечує стійкість до дрейфу та втрати об’єкта супроводження.

Запропонований алгоритм був реалізований на мові програмування *Python*.

Для перевірки працездатності та оцінки ефективності розробленого методу підвищення точності оптичної системи супроводження було проведено модельні експериментальні дослідження із застосуванням відеокамери та обчислювального компонента, на якому було розміщено розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення. У якості об’єкта інтересу було обрано радіокеровану модель автомобіля, що рухається.

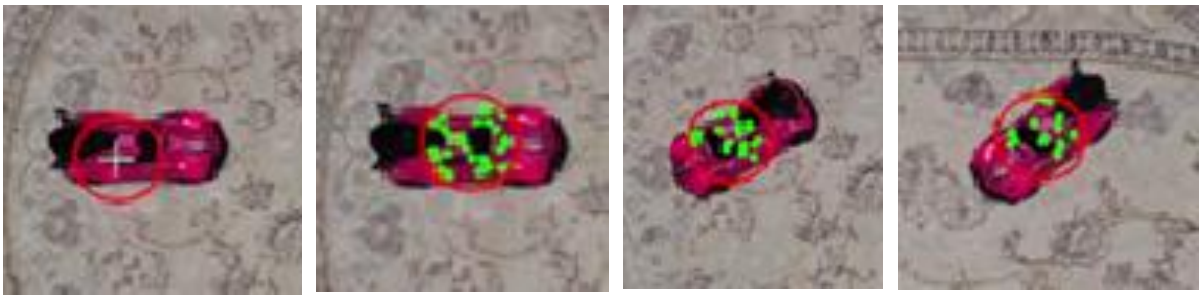

Рис. 3. Результати експериментальної перевірки роботоздатності системи

На рис. 3 представлено послідовність стоп-кадрів, що ілюструють ключові етапи роботи розробленої системи. Перший кадр демонструє мо-

мент вибору об'єкта інтересу оператором шляхом накладання маски у вигляді кола. При цьому можливий варіант виділення не всього об'єкта в цілому, а тільки необхідної характерної області.

На наступних стоп-кадрах, що відображають моменти послідовного неперервного руху об'єкта, показано роботу системи по виділенню ключових точок об'єкта та його фіксації в заданій області інтересу.

З наведених результатів можна зробити висновок, що система дозволяє ефективно супроводжувати об'єкт, утримуючи його в області інтересу, навіть в умовах зменшення кількості ключових точок у процесі динамічного руху моделі.

Висновки

Проведений аналіз існуючих підходів до вирішення проблем супроводження об'єкта інтересу (орієнтира) бортовими оптичними системами БПЛА, включаючи класичні методи, кореляційні фільтри та методи глибокого навчання, виявив певні обмеження кожного з них, зокрема неможливість досягнення компромісу між точністю, робастністю та обчислювальною складністю, особливо для систем з обмеженими ресурсами.

У роботі було запропоновано комплексний метод оптичного наведення, який реалізований у розробленій структурній схемі оптичної системи, що інтегрує переваги аналізу контрольних точок для оцінки геометричного положення об'єкта (орієнтира), модуля обробки оптичного потоку для визначення його кінематичних параметрів, та фільтра Калмана для оптимального оцінювання його стану. Відфільтрована оцінка стану з фільтра Калмана використовується для уточнення області інтересу та покращення прогнозування положення візуальних ознак для модулів обробки контрольних точок та оптичного потоку, а періодична валідація контрольних точок шляхом *ORB*-перевірки сприяє стійкості до дрейфу параметрів.

Розроблений алгоритм роботи системи включає етап ініціалізації цілі оператором з подальшим переходом до повністю автономного режиму супроводження, що включає захоплення кадру, обробку оптичного потоку та визначення контрольних точок, фільтрацію Калмана та генерацію керуючих сигналів.

Проведені модельні дослідження із застосуванням відеокамери, обчислювального компонента, на якому було розміщено розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення, підтвердили правильність прийнятих рішень та ефективність роботи під час супроводженні рухомого об'єкта інтересу.

Список використаної літератури

1. *Xiangrui Tian 1, Yinjun Jia 1, Xin Luo 1, Jie Yin.* Small Target Recognition and Tracking Based on UAV Platform / X. Tian та ін. Sensors. 2022. T. 22,

№ 17. С. 6579. URL: https://doi.org/10.3390/s22176579 (дата звернення: 10.04.2025).
2. *Hamdi A., Salim F., Kim D. Y. DroTrack:* High-speed Drone-based Object Tracking Under Uncertainty. 2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), м. Glasgow, United Kingdom, 19–24 лип. 2020 р. 2020. URL: https://doi.org/10.1109/fuzz48607.2020.9177571 (дата звернення: 10.04.2025).
3. *Xin Huang, Ding Wang, Qiqi Zhu, Ying Zheng, Qingfeng Guan.* Single target tracking in high-resolution satellite videos: a comprehensive review / X. Huang та ін. Geo-spatial Information Science. 2024. С. 1–30. URL: https://doi.org/10.1080/10095020.2024.2305912 (дата звернення: 10.04.2025).
4. *Ho H. W., Chu Q.* Automatic Landing System of a Quadrotor UAV Using Visual Servoing. Delft. 2013. 11 квіт.
5. *Yongxiang He, Chuang Chao, Zhao Zhang, Hongwu Guo * and Jianjun Ma.* UAV Visual Object Tracking Based on Spatio-Temporal Context / Y. He та ін. Drones. 2024. Т. 8, № 12. С. 700. URL: https://doi.org/10.3390/drones8120700 (дата звернення: 10.04.2025).
6. *Chun-bao LI*, Bo YANG and Chun-hu LI.* Deep Learning Based Visual Tracking: A Review. DEStech Transactions on Computer Science and Engineering. 2017. Smce. URL: https://doi.org/10.12783/dtcse/smce2017/12427 (дата звернення: 10.04.2025).
7. *Wang, Bingshu; Li, Qiang; Mao, Qianchen; Wang, Jinbao; Chen, C. L. Philip; Shangguan, Aihong ; Zhang, Haosu.* A Survey on Vision-Based Anti Unmanned Aerial Vehicles Methods / B. Wang та ін. Drones. 2024. Т. 8, № 9. С. 518. URL: https://doi.org/10.3390/drones8090518 (дата звернення: 10.04.2025).
8. *by Xiangrui Tian,Yinjun Jia,Xin Luo, Jie Yin.* Small Target Recognition and Tracking Based on UAV Platform / X. Tian та ін. Sensors. 2022. Т. 22, № 17. С. 6579. URL: https://doi.org/10.3390/s22176579 (дата звернення: 10.04.2025).
9. *Song I., Lee J.* SFTrac: A Robust Scale and Motion Adaptive Algorithm for Tracking Small and Fast Moving Objects. 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), м. Abu Dhabi, United Arab Emirates, 14–18 жовт. 2024 р. 2024. С. 10870–10877. URL: https://doi.org/10.1109/iros58592.2024.10802537 (дата звернення: 10.04.2025).
10. *Hao Du, Wei Wang, Chaowen Xu, Ran Xiao, Changyin Sun.* Real-Time Onboard 3D State Estimation of an Unmanned Aerial Vehicle in Multi-Environments Using Multi-Sensor Data Fusion / H. Du та ін. Sensors. 2020. Т. 20, № 3. С. 919. URL: https://doi.org/10.3390/s20030919 (дата звернення: 10.04.2025).