

УДК 623.746.-519



К. О. Спорішев



К. І. Бордунова



І. А. Білан

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ УПРАВЛІННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ У ЗАВADOVІЙ ОБСТАНОВЦІ

*У статті розглядаються труднощі використання безпілотних літальних апаратів (БпЛА) в умовах активного військового протистояння.*

*Проаналізовано пропозиції щодо підвищення стійкості управління БпЛА, зокрема через використання новітніх технологій навігації, як-от оптичні системи, а також ширококугові технології передавання даних, які підвищують заводостійкість. Розглядається концепція роїв дронів, що забезпечує високу координацію дій та адаптивність до змін в умовах бойових дій. Важливу роль у забезпеченні автономності БпЛА відіграє застосування штучного інтелекту та адаптивних алгоритмів обробки сигналів. Наголошено на необхідності інтеграції новітніх технологій для підвищення ефективності та надійності БпЛА в умовах сучасного протистояння.*

*К л ю ч о в і с л о в а : безпілотні літальні апарати, заводова обстановка, ширококугові технології передавання даних, канали передавання інформації, антенні пристрої, радіоелектронна боротьба, обробка сигналів, навігація.*

**Постановка проблеми.** У сучасних військових конфліктах безпілотні літальні апарати (БпЛА) стали невід'ємною складовою озброєння, що активно використовується для виконання широкого спектра завдань. Застосування БпЛА виявилось особливо значущим у контексті збройного протистояння між Україною та російською федерацією, де ці технології демонструють свою ефективність. Сфера їх використання охоплює розвідувальні операції, коригування вогню артилерії, доставку вантажів, а також виконання стратегічних ударів у глибокому тилу противника. Щороку спостерігається суттєве зростання кількості та функціональних можливостей цих апаратів, що робить їх ключовим елементом сучасних бойових дій.

У 2024 році Україна значно посилила свої позиції у виробництві та використанні безпілотних літальних апаратів, розширивши національні виробничі потужності та отримуючи підтримку від міжнародних партнерів. Так, кількість виготовлених дронів зросла з 300 тис. у 2023 році до 4 млн у 2024 році [1]. Цей показник свідчить про кардинальне зростання виробничих можливостей та активне впровадження новітніх технологій у військову сферу. Суттєвим кроком у розвитку застосування БпЛА стало підписання Президентом України закону у 2024 році, згідно з яким Сили безпілотних систем були виділені в окремий рід Збройних Сил України [2]. Це рішення закріпило стратегічну важливість безпілотних технологій у забезпеченні обороноздатності країни. У сучасних БпЛА значно покращені тактико-технічні характеристики, що дозволяє їм виконувати завдання з великою точністю, зокрема завдавати ударів на значній відстані вглиб території противника [3].

Попри численні організаційні та технічні заходи, спрямовані на вдосконалення сучасних безпілотників, ефективність їх застосування залишається на недостатньому рівні. Основними причинами цього є збільшення кількості мобільних засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), які противник активно використовує для створення перешкод у роботі систем навігації та управління БпЛА. Засоби РЕБ блокують супутникові сигнали, що ускладнює виконання завдань безпілотними системами. Окрім того, розвиток антидронових систем і новітніх мобільних засобів РЕБ значно підвищує вимоги до захисту безпілотних систем.

В умовах сучасного протистояння особливо важливим є забезпечення стійкості та автономності систем БпЛА. У ситуаціях, коли супутникові сигнали відсутні через застосування засобів РЕБ або географічні обмеження, зростає потреба у створенні більш надійних альтернатив. Це вимагає розробки інноваційних систем, здатних працювати в умовах активної протидії з боку противника.

Необхідно розробляти та впроваджувати системи нового покоління. Вони мають бути адаптовані до роботи в умовах активної протидії, мінімізувати залежність від зовнішніх сигналів і використовувати алгоритми, що враховують складні геометричні трансформації та забезпечують високу точність навіть у найскладніших умовах. Отже, удосконалення рішень для захисту каналів передавання даних у БпЛА стане ключовим фактором підвищення їх ефективності у виконанні тактичних і стратегічних завдань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Значний внесок у дослідження проблемних питань застосування БпЛА зробили такі вчені: Д. І. Жуков, К. П. Квіткін, І. В. Ковальов, О. Ю. Луньов, В. А. Лупандін, Г. В. Мегельбей, І. А. Нікіфоров, М. А. Павленко, І. В. Пулеко, В. М. Самойленко, Д. О. Сізон, О. М. Сотніков, О. Б. Танцюра, І. М. Тіхонов, А. В. Тристан, О. І. Тимочко, О. В. Федін, та ін.

**Метою статті** є аналіз шляхів підвищення стійкості управління безпілотним літальним апаратом у заводській обстановці.

**Виклад основного матеріалу.** Шляхи підвищення стійкості систем управління БпЛА в заводській обстановці включають різноманітні технічні та технологічні рішення.

Перспективи розвитку і застосування БпЛА демонструють стрімке вдосконалення технологій створення та управління роями (групами) дронів. Концепція роїв БпЛА передбачає високий рівень координації дій між апаратами, які здатні взаємодіяти як один комплексний організм, реагуючи на змінні умови середовища та завдань. Кожен дрон у рої функціонує за базовими правилами, проте, у взаємодії вони забезпечують виконання складних операцій, як-от: самостійний вибір маршрутів, визначення цілей і прийняття рішень. Рої діють без єдиного лідера, що забезпечує їхню здатність до адаптації в умовах втрати окремих елементів.

Планується, що рої БпЛА запускатимуться з різних платформ, включно з кораблями, літаками та наземною технікою. Вони виконуватимуть широкий спектр завдань, зокрема здійснюватимуть радіоелектронну розвідку, нестимуть засоби РЕБ та засоби нанесення ударів [4–6].

Особливістю роїв є можливість включення до їхнього складу дронів різних класів, що значно ускладнює заходи протидії таким системам. Протидія групам БпЛА є значно складнішою, порівнюючи з боротьбою проти окремих БпЛА.

Рої БпЛА мають значні переваги над одиничними апаратами [4]:

- здатність одночасно здійснювати скоординовані атаки з різних напрямків;
- збереження боєздатності після втрати окремих дронів;
- можливість ведення розподіленої розвідки або фокусування на точкових цілях з високою точністю, подібно до високоточної зброї;
- проведення ефективної РЕБ у широкому діапазоні частот.

До складу роїв можуть входити БпЛА різних класів: від нано- та мікро- до тактичних і оперативно-тактичних. Відстань між апаратами у рої може варіюватися від кількох сантиметрів до десятків метрів, що залежить від завдання. Такі рої здатні виконувати багатофункціональні операції – від розвідки до ударних дій, а також забезпечувати радіоелектронну підтримку.

Попри зусилля зі зменшення вартості виробництва БпЛА, рої залишаються технічно складними системами. Основною проблемою при створенні таких систем є розроблення ефективної технології обміну інформацією між окремими апаратами. У рої кожен дрон може виконувати різні функції: оптико-електронна чи радіолокаційна розвідка, нанесення ударів відповідно до бойового навантаження, а також оброблення та передавання даних. На відміну від класичних систем, де зв'язок обмежується схемою «оператор – БпЛА», у роях потрібна складна мережева взаємодія за схемою «БпЛА – БпЛА».

Система управління роями може базуватися як на централізованому, так і на децентралізованому підході, залежно від завдань і умов їх виконання. Централізована модель передбачає використання єдиного центру управління, тоді як децентралізована дозволяє дронам самостійно обмінюватися інформацією та координувати дії. Обидва підходи мають свої переваги й недоліки, проте, у бойових умовах перевагу можуть отримати гібридні системи, що поєднують ці принципи. Розвиток ройових технологій створює нові виклики у сфері захисту і протидії таким системам [4–6].

Одним з перспективних шляхів підвищення стійкості управління БпЛА в заводській обстановці є перехід до оптичних каналів управління. Оптичні системи навігації активно розвиваються, пропонуючи інноваційні підходи до визначення місцезнаходження об'єктів і забезпечення їхньої автономної роботи. До ключових технологій належать такі.

Системи візуальної одометрії (Visual Odometry). Використовують зображення для оцінювання змін у положенні об'єкта. Ця технологія знаходить широке застосування в автономних транспортних засобах і робототехніці, забезпечуючи точне відстеження переміщень у реальному часі.

Системи стереозору (Stereo Vision Systems). Задіяно дві або більше камер для створення тривимірної моделі навколишнього середовища. Це дозволяє точно визначати відстані до об'єктів і забезпечувати глибоке сприйняття простору.

Системи на основі орієнтирів (Landmark-Based Tracking). Використання природних або штучних орієнтирів дозволяє значно підвищити точність навігації. Цей підхід зменшує похибки при переміщенні об'єктів у складних умовах.

LIDAR. Лазерні сканери у поєднанні з оптичними камерами створюють високоточні тривимірні карти місцевості, забезпечуючи ефективну навігацію в реальному часі навіть у складних умовах.

Гібридні системи (GPS + оптика). Поєднання GPS та оптичних технологій дозволяє досягати більшої точності позиціонування, особливо у випадках, коли сигнали супутникової навігації обмежені або недоступні.

Існуючі системи оптичної навігації на основі орієнтирів:

- DARPA ALIAS – система автоматизації, яка забезпечує навігацію літаків за зовнішніми орієнтирами;
- TERPROM – використовує рельєф місцевості для високоточного позиціонування літаків та ракет;
- VINS (Visual Inertial Navigation System) – комбінована система, яка використовує камери та інерційні датчики для навігації БпЛА і роботів;
- Land Warrior System – застосовується для відстеження позицій солдатів на полі бою за допомогою оптичних систем.

Кореляційно-екстремальна система навігації (KECH) [7–9]. Порівнює отримані в реальному часі дані місцевості із заздалегідь відомими шаблонами для визначення точного положення. KECH має низку переваг, але також стикається з важливими обмеженнями:

- залежність від змін у ландшафті через бойові дії або природні катастрофи, що може знижувати точність навігації;
- чутливість до погодних умов; туман, сніг можуть завадити ефективній роботі системи;
- високі вимоги до потужності обчислювальних пристроїв, що збільшує витрати енергії та вартість обладнання;
- проблеми із затримками обробки інформації; обробка даних у реальному часі може призводити до затримок у прийнятті рішень;
- помилки в базових даних на картах призводять до втрати орієнтації.

До основних характеристик оптичних систем навігації відносять: точність – від сантиметрів до метрів, залежно від умов освітлення і типу орієнтирів; діапазон – від десятків метрів до кількох кілометрів; частота оновлення – від 10 кадрів на секунду до 60 кадрів на секунду; обробка даних – використовують потужні процесори для аналізу в реальному часі; типи орієнтирів – природні (дерева, будівлі) і штучні (маяки).

Недоліки оптичних систем: залежність від освітлення – туман, дощ, сніг або сильне сонячне світло суттєво впливають на видимість орієнтирів; складнощі монотонних ландшафтів – у пустелях або на великих водних просторах система може втратити ефективність; час на калібрування – налаштування системи вимагає значних ресурсів і часу; уразливість штучних орієнтирів – їх пошкодження або видалення призведе до збоїв; обмеження в динамічних умовах – при швидких змінах обстановки система може не встигати адаптуватися [10–13].

Для підвищення ефективності оптичних систем необхідна інтеграція з іншими технологіями, якот: інерційні датчики та сучасні алгоритми штучного інтелекту. Це дозволить забезпечити точну навігацію навіть у складних умовах і підвищити надійність роботи таких систем.

Одним із поширених шляхів підвищення стійкості управління БпЛА в заводській обстановці є підвищення заводостійкості радіоканалів управління. А одним із методів підвищення заводостійкості є використання ширококутових технологій передавання даних.

Використання технологій FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) та DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) дозволяє розширити спектр сигналу, що підвищує стійкість до завад.

Технологія FHSS передбачає швидке перемикання несучої частоти сигналу за певною псевдовипадковою послідовністю. Завдяки цьому сигнал стає менш уразливим до вузькосмугових

завад, оскільки перешкоди на одній частоті не впливають на загальне передавання даних. FHSS широко використовується у військових комунікаціях та в стандартах Bluetooth для забезпечення надійності зв'язку [14].

DSSS технологія передбачає розширення спектра сигналу за допомогою множення вихідного сигналу на псевдовипадкову шумову послідовність з більш високою швидкістю. Це робить сигнал стійким до завад і ускладнює його перехоплення та демодуляцію сторонніми особами. DSSS використовується в стандартах Wi-Fi (наприклад, IEEE 802.11b) для підвищення безпеки та надійності [15].

Кодування та шифрування сигналів також дозволяє підвищити заводостійкість радіоканалів управління. Помилкостійкі коди використовуються для виявлення та виправлення помилок, що виникають під час передавання даних через шумні канали. Приклади таких кодів: коди Хеммінга, циклічні коди та коди Ріда – Соломона. Такі методи підвищують надійність передавання, дозволяючи відновлювати пошкоджені дані [16].

Шифрування забезпечує конфіденційність та цілісність переданих даних. Використання криптографічних алгоритмів, як-от: AES (Advanced Encryption Standard) або RSA, захищає інформацію від несанкціонованого доступу та модифікації [17].

Адаптивні фільтри та алгоритми обробки сигналів використовуються для покращення якості прийнятого сигналу шляхом динамічної компенсації завад. Наприклад, алгоритм найменших квадратів (LMS) дозволяє системі навчатися та адаптуватися до змін у характеристиках каналу.

Компенсація завад може здійснюватися через технології просторової фільтрації, наприклад, формування діаграми спрямованості (beamforming), що підсилює сигнал у напрямку надійного прийому та зменшує вплив інтерференції з інших напрямків.

Використання технологій MIMO (Multiple Input Multiple Output) дозволяє одночасно передавати та приймати кілька потоків даних через кілька антен, що підвищує пропускну здатність і надійність зв'язку [18].

Множинний доступ забезпечується такими методами:

- FDMA (Frequency Division Multiple Access) – розподіл частотного спектра між користувачами;
- TDMA (Time Division Multiple Access) – розподіл часу передачі між користувачами;
- CDMA (Code Division Multiple Access) – використання унікальних кодів для розділення сигналів;
- OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) – поєднує переваги FDMA та TDMA для ефективного використання спектра [19].

Поєднання різних технологій та методів передавання даних дозволяє створити стійкі до завад та перешкод системи зв'язку. Використання ширококутових технологій, адаптивних алгоритмів обробки сигналів, ефективних методів кодування та шифрування, а також оптимізація потужності передавача забезпечують надійність та безпеку зв'язку в складних умовах.

Інтеграція різних систем зв'язку:

- гібридні системи – поєднання радіо- та оптичних каналів для забезпечення стійкості зв'язку в різних умовах;
- супутниковий зв'язок – використання глобальних супутникових систем для управління БпЛА на великих відстанях і в умовах сильних завад.

Підвищення автономності БпЛА:

- автономні навігаційні системи – впровадження інерціальних систем навігації і GPS з корекцією, щоб БпЛА міг виконувати завдання у разі тимчасової втрати зв'язку;
- штучний інтелект і машинне навчання – для прийняття рішень на борту без необхідності постійного контролю з землі.

Організаційно-технічні заходи: планування місії з урахуванням завад – вибір маршрутів і висот польоту, де вплив завад мінімальний.

Моніторинг спектра і адаптація: постійний аналіз радіообстановки і динамічна зміна параметрів зв'язку.

Вибір конкретних методів залежить від типу БпЛА, умов його використання та потенційних джерел завад. Комплексний підхід, який поєднує кілька вищезазначених методів, зазвичай дає найкращі результати щодо підвищення стійкості системи управління в заводській обстановці.

## Висновки

Сучасні технології БпЛА відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності військових операцій, виконуючи широкий спектр завдань – від розвідки та моніторингу до ударних дій і підтримки зв'язку. Водночас динамічний розвиток засобів РЕБ створює нові проблеми забезпечення їх надійного функціонування.

Для підвищення ефективності застосування БпЛА необхідно орієнтуватися на розроблення автономних і стійких систем управління, що дозволяють мінімізувати залежність від зовнішніх навігаційних сигналів і враховують складні умови ведення бойових дій.

Серед перспективних напрямів вдосконалення виділяють такі.

Інноваційні підходи до навігації. Використання оптичних і комбінованих систем, які забезпечують високу точність позиціонування навіть за відсутності супутникових сигналів. Інтеграція візуальних, інерційних та інших навігаційних рішень.

Розвиток систем зв'язку. Застосування ширококутових технологій і адаптивних алгоритмів, що підвищують завадостійкість. Оптимізація конструктивних елементів (антен і фільтрів) для забезпечення якісного передавання даних у складних умовах.

Автономність і гнучкість управління. Концепція роїв БпЛА як майбутнє бойового використання, що забезпечує одночасне виконання складних завдань і високу адаптивність до змін обстановки.

Використання штучного інтелекту для підвищення рівня автоматизації.

Комплексний підхід до планування операцій. Урахування можливих перешкод і вибір оптимальних маршрутів. Динамічна адаптація до змін бойової ситуації.

Подальший розвиток БпЛА повинен бути спрямований на інтеграцію сучасних технологій, що дозволить забезпечити високу ефективність і надійність їх роботи в умовах постійного протистояння. Ці заходи сприятимуть зміцненню обороноздатності та створенню нових можливостей для виконання стратегічних і тактичних завдань.

## Перелік джерел посилання

1. Сайт Гордон.ua. URL:<https://gordonua.com/ukr/news/money/ukrajina-za-rik-zbilshila-virobnitstvodroniv-u-10-raziv-1722129.htm>. (дата звернення: 05.05.2025).
2. Сайт Radiosvoboda. URL:<https://www.radiosvoboda.org/a/news-zakon-syly-bezpilotnykh-system/33122138.html>. (дата звернення: 05.05.2025).
3. Сайт Укрінформ. URL:<https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3922251-statistika-atak-ukrainskimi-dronami-vglib-rosii-u-2024-roci.html>. (дата звернення: 05.05.2025).
4. Самойленко В. М., Лупандін В. А., Мегельбей Г. В. Обґрунтування напрямів захисту об'єктів та озброєння і військової техніки від роїв безпілотних літальних апаратів. *Наука і техніка Повітряних сил Збройних Сил України*. 2021. № 4 (45). С. 58–64. DOI:10.30748/nitps.2021.45.07.
5. Тристан А. В., Жуков Д. І. Моделі самоорганізації колективу однорідних безпілотних літальних апаратів при рішенні слабоформалізованих завдань. *Наука і техніка Повітряних сил Збройних Сил України*. 2024. № 2 (55). С. 32–39.
6. Квіткін К. П., Тристан А. В., Сізон Д. О. Аналіз методів формування раціонального складу колективу різнорідних безпілотних літальних апаратів для виконання бойових завдань. Системи обробки інформації. 2024. № 4 (175). С. 42–49.
7. Пулеко І. В. Інформаційна технологія навігації малого безпілотного літального апарата за оптичним полем Землі в умовах пропадання сигналів супутникових радіонавігаційних систем. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем* : зб. наук. пр. Житомирського військ. ін-ту ім. С. П. Корольова. Житомир, 2018. Вип. 15. С. 118–129.
8. Самойленко В. М. Обґрунтування застосування автономних безпілотних літальних апаратів, що оснащені оптико-електронною системою навігації, для виконання завдань підрозділами Національної гвардії України. *Честь і закон*. 2023. № 4 (87). С. 83–91.
9. Модель опису процесу функціонування комбінованої кореляційно-екстремальної системи навігації безпілотного літального апарата / Сотніков О. М., Тимочко О. І., Танцюра О. Б., Федін О. В. *Військово технічний збірник Національної академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного*. Львів, 2018. № 18. С. 9–13.

10. Ковальов І. В., Спорішев К. О., Луньов О. Ю. Методика визначення раціонального порядку застосування розвідувальних безпілотних літальних апаратів при виконанні завдань з припинення масових заворушень силами Національної гвардії України. *Честь і закон*. 2018. № 4. С. 26–37.
11. Луньов О. Ю. Модель раціонального руху безпілотних літальних апаратів на основі рішення задачі комівояжера при виконанні завдань з припинення масових заворушень силами Національної гвардії України. *Честь і закон*. 2019. № 1 (68). С. 31–37.
12. К. О. Спорішев, О. Ю. Луньов, М. В. Матросов. Порядок планування раціонального застосування розвідувальних безпілотних літальних апаратів при виконанні завдань з припинення масових заворушень силами Національної гвардії України. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського*. Київ, 2018. Т. 29. № (6). С. 100–105.
13. Павленко М. А., Тіхонов І. М., Нікіфоров І. А. Рекомендації щодо ефективного використання ударних безпілотних літальних апаратів в операції об'єднаних сил. *Наука і техніка Повітряних сил Збройних Сил України*. 2021. № 1 (42). С. 131–136.
14. Stallings, W. (2005). *Wireless Communications and Networks* (2nd ed.). Pearson Education. 642 p.
15. Peterson, R. L., Ziemer, R. E., & Borth D. E. (1995). *Introduction to Spread Spectrum Communications*. Prentice Hall.
16. Lin, S., & Costello, D. J. (2004). *Error Control Coding* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
17. Schneier, B. (2015). *Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code in C* (20th Anniversary ed.). Wiley.
18. Tse, D., & Viswanath, P. (2005). *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press.
19. Dahlman, E., Parkvall, S., & Skold, J. (2016). *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G* (3rd ed.). Academic Press.

*Стаття надійшла до редакції 21.05.2025 р.*

**UDC 623.746.-519**

**К. Sporychev, K. Bordunova, I. Bilan**

### **WAYS TO ENHANCE THE STABILITY OF UNMANNED AERIAL VEHICLE MANAGEMENT IN JAMMING CONDITIONS**

*The article addresses the modern challenges faced by unmanned aerial vehicles (UAVs) in the context of active military confrontation. The relevance of the topic is driven by the increasing role of UAVs in military conflicts, particularly in the context of the war between Ukraine and Russia. In 2024, Ukraine significantly increased drone production, highlighting the importance of unmanned technologies for national defense. However, the effectiveness of their application remains insufficient due to the growing number of electronic warfare (EW) systems that complicate UAV management.*

*The article analyzes proposals for enhancing the stability of UAV management, particularly through the use of cutting-edge navigation technologies such as optical systems, as well as wideband data transmission technologies that improve jamming resistance. The concept of drone swarms is discussed, providing high coordination of actions and adaptability to changes in combat conditions. The application of artificial intelligence and adaptive signal processing algorithms plays a crucial role in ensuring UAV autonomy. In conclusion, the article emphasizes the need for integrating cutting-edge technologies to enhance the effectiveness and reliability of UAVs in contemporary confrontation conditions.*

*Keywords: unmanned aerial vehicles, jamming conditions, wideband data transmission technologies, information transmission channels, antenna devices, electronic warfare, signal processing, navigation.*

**Спорішев Костянтин Олександрович** – доктор наук з державного управління, доцент, заступник начальника центру імітаційного моделювання Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0003-4737-9698>

**Бордунова Каріна Ігорівна** – науковий співробітник центру імітаційного моделювання Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0009-0005-9015-4998>

**Білан Ірина Анатоліївна** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз.

<https://orcid.org/0000-0003-1237-1565>