

УДК 629.7

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317891>

Д. А. Вадіс¹, В. В. Аврутов², *д.т.н., професор*

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ БПЛА

Ua

Інтеграція інноваційних рішень у всі рівні системи БПЛА дозволяє значно підвищити ефективність їх роботи в найрізноманітніших умовах і завданнях.

¹ КПП ім. Ігоря Сікорського

² КПП ім. Ігоря Сікорського

Основною проблемою при використанні безпілотників є ефективне планування маршрутів польоту. Недосконалість моделей і методів планування маршрутів призводить до втрати безпілотних літальних апаратів та зниженню ефективності виконання завдань. В оглядовій статті розглянуто методи, які автоматизують процеси планування маршрутів і знижують вплив людського фактору на управління. Важливою проблемою є виявлення атак на навігаційну систему БПЛА, оскільки такі атаки безпосередньо впливають на здатність безпілотників виконувати свої функції, тому в статті розглянуто методи для виявлення спуфінгу GPS та способу автоматичного повернення БПЛА в зону старту при виявленні зовнішніх кібератак на нього. Також в статті наведені перспективні напрямки використання штучного інтелекту в безпілотниках. Розглянуто інноваційні підходи, серед яких: генеративний дизайн, алгоритми керування роєм, комп'ютерний зір і методи інформаційно-екстремального навчання, що сприяють розширенню функціональних можливостей БПЛА.

En The integration of innovative solutions into all levels of the UAV system can significantly improve the efficiency of their operation in a variety of conditions and tasks. The main challenge in using drones is efficient flight route planning. The imperfection of route planning models and methods leads to the loss of unmanned aerial vehicles and a decrease in the efficiency of performing tasks. This review article discusses methods that automate route planning processes and reduce the influence of the human factor on control. An important issue is detecting attacks on the UAV navigation system, as such attacks directly affect the ability of drones to perform their functions, so the article discusses methods for detecting GPS spoofing and a way to automatically return the UAV to the launch area when external cyberattacks are detected. The article also outlines promising areas of artificial intelligence application in drones. Innovative approaches, such as generative design, swarm control algorithms, computer vision, and information-extreme learning methods, are considered, which help to expand the functionality of UAVs.

Вступ

У сучасному світі безпілотні літальні апарати (БПЛА) можуть виконувати широкий спектр задач у різних галузях: від кінематографії до рятувальних та військових операцій. В Україні після повномасштабного вторгнення стрімко зростає роль БПЛА на полі бою. Безпілотники виконують різноманітні завдання – від розвідки та дистанційного мінування, до коригування вогню та завдання ударів по цілям. БПЛА є перетином двох важливих тенденцій у військовій техніці: точного характеру зброї та зростання роботизації, коли техніка керується дистанційно без ризику для пілота. Безпілотники, що використовуються у сучасній війні, змінили динаміку військових операцій, запропонували унікальні тактичні переваги та підвищивши оперативну ефективність у різних бойових сценаріях.

На сьогоднішній день стає дедалі актуальнішим використання безпілотників для доставки медикаментів і боєприпасів на фронті. Це пов'язано із їхньою здатністю оперативно й ефективно доставляти вантажі у важко-

доступні райони. Важливу роль грає ефективність і надійність БПЛА, що дає їм змогу доставляти вантажі швидше і точніше, що критично в ситуаціях, коли час має вирішальне значення, наприклад, під час екстреної медичної допомоги, або в умовах бою.

Таким чином, актуальним завданням є підвищення функціональної ефективності БПЛА, що дозволить забезпечити більш високу надійність та ефективність безпілотників у різних галузях для виконання поставлених задач.

Постановка задачі

Метою статті є проведення огляду сучасних методів підвищення функціональної ефективності БПЛА, зокрема: алгоритмів оптимізації маршрутів для підвищення точності виконання завдань; інноваційних підходів до захисту від кібератак, які забезпечують безпеку даних і управління безпілотником, а також інтеграції систем ШІ для підвищення автономності та адаптивності БПЛА.

Методи ефективного планування маршрутів БПЛА

Основною проблемою під час використання БПЛА є ефективне планування маршрутів польоту. Цей процес супроводжується значними часовими та обчислювальними складнощами, оскільки необхідно враховувати безліч факторів, таких, як погодні умови, наявність перешкод, активність ворожих систем ППО, а також потребу в оптимізації витрат ресурсів і забезпеченні максимальної ефективності пошуку та моніторингу об'єктів.

Недосконалість моделей і методів планування маршрутів призводить до втрати безпілотних літальних апаратів, зниження ефективності виконання завдань і збільшення експлуатаційних витрат. Оскільки БПЛА є дорогими та складними в обслуговуванні, розвиток інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, які автоматизують процеси планування маршрутів і знижують вплив людського фактора на управління безпілотними системами, є надзвичайно важливим.

У роботах [1], [2] запропоновані нові підходи до моделювання руху та планування маршрутів БПЛА, засновані на біологічно інспірованих алгоритмах. Нові методи побудови нейро-нечітких мереж дозволяють уникнути необхідності завантаження всієї навчальної вибірки у пам'ять комп'ютера, що значно пришвидшує процес синтезу моделей [3]. Однак, обмеженням таких методів є потреба розбивати нейромоделі на прямокутні блоки.

Враховуючи необхідність поєднання нейронної карти [1] із картою польотів у даному дослідженні, доцільно застосувати алгоритм нейронної мережі Хопфілда [4] для створення матриці станів усіх нейронів мережі.

Це дозволяє виділяти області довільної форми всередині матриці, де можна синтезувати маршрути БПЛА для розв'язання задачі комівояжера.

Існує багато методів для розв'язання задачі комівояжера (*TSP*), проте вони споживають значні обчислювальні та часові ресурси, що зростають експоненціально із збільшенням кількості вузлів — до 10 секунд для 20 точок маршруту [4]. У швидко динамічних процесах, де БПЛА рухаються зі швидкістю від 20 до 30 м/с [5], просторовий коридор може бути пройдений швидше, ніж розрахується оптимальний маршрут. Тому доцільно перетворити *3D TSP*-задачу на більш просту і швидку для розв'язку двовимірну (*2D*) задачу [6].

Щоб знизити невизначеність інформації про дані маршрути і сформувати раціональний маршрут моніторингу об'єктів спостереження у роботі [7] було удосконалено метод автоматизованого планування маршруту польоту БПЛА для пошуку динамічного об'єкту, який на відміну від існуючих враховує невизначеність у діях протилежної сторони, формує варіанти прогнозу руху, оцінює динамічні характеристики об'єкту на кожному із варіантів можливих маршруті його руху. Також у даній роботі було вдосконалено метод автоматизованого планування маршруту польоту безпілотника для пошуку стаціонарних об'єктів, який, на відміну від існуючих, враховує зв'язаність структури цих об'єктів на різних топологічних рівнях. Це дозволяє оцінити важливість кожного типу об'єктів у загальній структурі. А у роботі [8] було вдосконалено метод моделювання траєкторії руху БПЛА на основі стохастичних диференціальних рівнянь Ланжевена за рахунок застосування теоретичних засад «прогулянок Лєві» та «польотів Лєві». Це дало можливість прогнозувати поведінку групи безпілотників із урахуванням зовнішніх збурень на подоби бронуївського руху, а також перешкоди руху. Для визначення траєкторії безпілотника була застосована фінансова модель Блека-Шоулза, яка дала можливість сформулювати точне рішення рівняння Ланжевена для роботизованих систем.

У роботі [9] було запропоновано аналітико-обчислювальний метод передпольотного планування траєкторії руху БПЛА засобами бортової системи керування із урахуванням зміни динамічних характеристик безпілотника. Планування траєкторії полягає у врахуванні динамічних характеристик БПЛА кусково-змінної маси для випадку, коли точка скидання вантажу є опорною точкою маршруту, що може знаходитися на будь-якому кусково-постійному відрізку або напівінтервалі траєкторії польоту БПЛА, за винятком першого відрізка, матричній формалізації процедури побудови траєкторії; у введенні нового типу матриць — матриці коефіцієнтів розкладання функції на найпростіші дроби у формі Бистрова-Тетеріна. Метод не містить методичної похибки, допускає паралельне виконання операцій із матрицями засобами бортових обчислювачів. Розроблений аналітико-числовий метод дає змогу засобами бортових засобів балістико-навігаційного забезпечення планувати траєкторію руху БПЛА одночасно

для всіх опорних точок маршруту, точок скидання вантажу і розриву траєкторії з урахуванням зменшення запасів пального і маси корисного навантаження.

У роботі [10] запропоновано метод маршрутизації суб-роїв БПЛА на основі нейронної мережі Хопфілда. Цей підхід дозволяє уникнути дублювання моніторингових або технологічних функцій рою БПЛА в певних вузлах координатної сітки, яка покриває частину досліджуваної мапи. Запропонований метод суттєво скорочує час обстеження територій і сприяє більш ефективному використанню обчислювальних та енергоресурсів БПЛА, що збільшує їх термін служби. Практичне значення методу полягає у можливості продовження часу функціонування ресурснообмежених, недорогих птахоподібних БПЛА. Експериментальні дослідження підтвердили працездатність запропонованого методу. Було встановлено залежність моделі, синтезованої даним методом, від місця розташування точок вильоту кожного суб-рою боїдів. Отримана залежність дозволяє раціональніше обирати місце старту суб-роїв, кількість координатних сіток для покриття досліджуваної площі та відстань між вузлами сітки, що забезпечує оптимальну точність нейромоделі та знижує загальну вартість маршрутизації.

У роботі [11] була запропонована математична модель, що дозволяє оптимізувати процес планування маршрутів польоту (знаходити оптимальний маршрут польоту) розвідувального БПЛА класу тактичний літакового типу із можливих варіантів із урахуванням умов зовнішнього впливу. У результаті було розроблено математичну модель, яка відрізняється від існуючих такими особливостями:

- врахуванням вимог завдань та умов протидії з боку противника;
- використанням математичних методів для планування маршруту польоту розвідувального БПЛА тактичної ланки із урахуванням ключових факторів впливу зовнішнього середовища;
- можливістю оперативно визначати числові значення основних критеріїв для планування польоту розвідувальних БПЛА тактичної ланки;
- оцінкою доцільності застосування конкретного типу БПЛА для виконання розвідувальної місії.

Запропонована модель планування маршруту польоту дозволяє підвищити ефективність планування польотів за основними критеріями; покращити показники живучості БПЛА; обґрунтовувати суб'єктивні рішення фахівця, який здійснює планування польоту розвідувальних БПЛА тактичного класу.

Підвищення ефективності захисту від кібератак

Проблема виявлення атак на навігаційну систему БПЛА є важливою, оскільки такі атаки безпосередньо впливають на здатність безпілотників виконувати свої функції. Хоча для забезпечення захисту вже було запро-

поновано кілька методів, що базуються на перед- і посткореляційній обробці сигналів, на сьогоднішній день актуальною є розробка алгоритмів машинного навчання для виявлення атак на приглушення навігаційного сигналу та/або спуфінгу навігаційної системи.

У роботі [12] автори рекомендують використовувати метод опорних векторів (*SVM*) на етапі прийому сигналу, оскільки він дозволяє аналізувати зміни у сигналі. Шляхом порівняння опорних і поточних вимірів можна виявляти аномалії. Додавання реальних даних спуфінгу та подавлення до навчальних даних *SVM* під час навчання сприяє підвищенню точності детектування. Порівняльний аналіз чотирьох експериментів, наведених у статті, свідчить про успішність підходу завдяки двом аспектам: актуальному навчальному набору для виявлення маніпуляцій сигналами ГНСС та ефективності методу *SVM* у цій задачі.

У роботі [13] пропонується метод виявлення спуфінгу *GPS* із використанням системи орієнтації та визначення курсу (*AHRS*), а також акселерометра для аналізу різниці значень прискорення, отриманих від *GPS* і інерційної системи навігації. Використання фільтра Калмана для оцінки прискорення від *GPS* і порівняння його із акселерометром дозволяє виявляти спуфінг. Якщо *GPS* недоступний, БПЛА можуть використовувати інерційні датчики для координації польоту, але це може призвести до помилок у визначенні положення, що є критичним у випадках атак на *GPS*. Для управління ризиками, автори статті [14] розробили методику управління з обмеженнями безпеки, яка використовує детектор атак для виявлення і перемикання між режимами надійного та аварійного керування. Система *ALT* оцінює потужність пристроїв спуфінгу за допомогою фільтра Калмана і використовує контролер евакуації, щоб БПЛА могли виїхати із зони дії спуфінгу у встановлений часовий інтервал. У роботі [15] розглядаються інші методи запобігання спуфінгу *GPS*, зокрема автономний моніторинг працездатності приймача, вимірювання співвідношення сигнал/шум і виявлення доплерівського зсуву. У роботі [16] запропоновано метод, який дозволяє БПЛА ідентифікувати джерело спуфінгу *GPS* за допомогою незалежної наземної інфраструктури, яка постійно аналізує дані про місцезнаходження БПЛА та час їх отримання. Метод виявився ефективним, забезпечуючи час виявлення менше 2 секунд і точність локалізації джерела спуфінгу до 150 метрів. У роботі [17] запропоновано використовувати аналіз автоматичного регулювання посилення сигналу у *GPS*-приймачі для виявлення можливих атак.

Автор роботи [18] запропонував алгоритм виявлення атаки на систему *GPS* БПЛА на основі його кібер-фізичних параметрів. Перевагою запропонованого методу є його обчислювальна простота та енергоефективність. Крім того, метод універсальний, оскільки може аналізувати будь-які параметри та працювати з різними типами доступних даних, незалежно від того, які датчики встановлені на БПЛА. Він дозволяє не тільки виявляти

аномалії, але й оцінювати зміни у закономірностях поведінки БПЛА та його станів. Якщо значення ентропії не є надто високими, і спостерігається одноразове збільшення, це може свідчити про зміну режиму польоту. Аналіз співвідношення параметрів дозволяє точно виявити атаку та визначити її тип.

У роботі [19] автор пропонує спосіб автоматичного повернення БПЛА у зону старту у разі виявлення зовнішніх кібератак на нього. Для цього використовують математичний апарат *GERT*-мережі, який дає можливість використати результати аналітичної оцінки достовірності сигналів із записом карти місцевості і просторових координат БПЛА, а також виконання польоту в режимі пошуку пеленга сигналу джерела зовнішніх кібератак за допомогою блока автоматичного визначення спроб кібератак, обмін вагами генерації із наземним комплексом управління у режимі ближньої передачі даних. У разі виявлення спроб кібератак відключають штатні системи керування за допомогою пристрою керування і активізують блок автоматичного повернення до зони старту.

БПЛА зі штучним інтелектом

У відповідь на зростаючі виклики, які створюють системи РЕБ, Україна активно розробляє безпілотники, керовані штучним інтелектом (ШІ). Ці передові БПЛА мають здатність працювати автономно, без постійного зв'язку з оператором. Завдяки інтеграції ШІ, такі дрони здатні самостійно ідентифікувати, фіксувати та знищувати цілі, що значно підвищує їхню ефективність і робить їх майже невразливими до спроб глушіння сигналів управління чи навігації.

Одним із перспективних напрямків застосування штучного інтелекту в розробці безпілотних літальних апаратів є використання генеративного дизайну. Завдяки генеративним змагальним мережам (*GAN*) можливо автоматизувати створення конструкцій дронів, які відповідають специфічним вимогам щодо аеродинаміки, ваги та міцності. Це не тільки спрощує процес проектування, а й сприяє впровадженню інновацій у конструктивні рішення БПЛА [20].

Навчання із підкріпленням (*RL*) є ще однією ключовою технологією, яка широко застосовується у безпілотних літальних апаратах, особливо для підвищення стабільності польоту та покращення ефективності маневрів. Завдяки *RL* дрони здатні самостійно навчатися знаходити оптимальні параметри управління у реальному часі, адаптуючись до змін у навколишньому середовищі [21].

Застосування генеративних алгоритмів може істотно підвищити стабільність роботи сенсорів безпілотних літальних апаратів. Завдяки генеративному доповненню даних штучний інтелект здатний створювати реаліс-

тичні тестові сценарії для калібрування сенсорів, що забезпечує більш високу точність отримуваних даних у реальних умовах польоту [22].

У сфері комп'ютерного зору конволюційні нейронні мережі (*CNN*) використовуються для аналізу та інтерпретації зображень та відео, отриманих із камер безпілотників. Це дає змогу дронам виконувати складні завдання, зокрема розпізнавання об'єктів, стеження за цілями та навігацію без участі людини [23].

Алгоритми керування роєм, як-от метод рою часток (*PSO*), дозволяють координувати дії групи БПЛА, наслідуючи природні моделі соціальної взаємодії, подібні до роїння птахів чи риб. Це сприяє ефективному розподілу завдань між дронами, оптимізації маршрутів і загальному підвищенню ефективності виконання місій. Використання алгоритмів оптимізації та методів машинного навчання дає змогу роюм дронів адаптуватися до змінних умов у реальному часі, що забезпечує високу стійкість і надійність їхньої роботи [24].

Використання штучного інтелекту відкриває можливості для автономного прийняття рішень безпілотними літальними апаратами. Складні алгоритми машинного навчання дозволяють дронам самостійно прокласти маршрути, ухилятися від перешкод, виконувати завдання пошуку та порятунку, а також здійснювати агротехнічні операції без участі оператора. Це значно підвищує ефективність застосування БПЛА в складних, важкодоступних або небезпечних для людей умовах [25].

У роботі [26] проведено аналіз завдань систем штучного інтелекту, які використовуються в перспективних закордонних та вітчизняних безпілотних авіаційних комплексах, проаналізовано перелік бортових систем перспективного безпілотного літального апарату, в яких можливо використовувати алгоритми систем штучного інтелекту. Представлено обрис перспективних алгоритмів штучного інтелекту для впровадження в бортове обладнання безпілотного літального апарату, які дають змогу підвищити ефективність виконання бойових завдань перспективними безпілотними авіаційними комплексами.

Автор роботи [27] вперше розробив метод інформаційно-екстремального машинного навчання автономного БПЛА для розпізнавання наземного транспортного засобу із оптимізацією рівня квантування яскравості пікселів кадру зони інтересу, що дозволяє детектувати контур транспортного засобу з метою визначення на ньому центру полярної системи координат для формування навчальної матриці. Також автор вдосконалив метод інформаційно-екстремального машинного навчання автономного БПЛА для відеомоніторингу місцевості за ієрархічною структурою даних у вигляді декурсивного бінарного дерева, що дозволяє побудувати у процесі машинного навчання із заданою глибиною безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила. Робота надає подальшого розвитку методу автономної відеонавігації за наземними природними та інфраструктурними

орієнтирами за відомими географічними координатами, що дозволяє визначати місцезнаходження автономного БПЛА без використання глобальної мережі позиціонування *GPS* і цим підвищити інформаційну та/або кіберзахищеність літального апарату.

Підвищення надійності БПЛА

Проблема надійності БПЛА завжди була дуже актуальною. Очевидно, що апаратурна надійність БПЛА складається із надійності його елементів (двигунів, паливної системи, системи керування та пілотажно-навігаційного обладнання тощо).

Обмежуючись рамками статті, розглянемо окремо надійність пілотажно-навігаційного обладнання. Частіше, таке обладнання складається із інерціально-навігаційної системи (ІНС) та супутникової навігаційної системи або *Global Navigation Satellite System (GNSS)*. Відомі випадки використання третьої системи. Наприклад, крилаті ракети Калібр-К, крім ІНС та *GNSS* використовують радіолокаційні станції (бортові радари), а крилаті ракети Томагавк, крім ІНС та *GNSS* використовують оптичні системи із цифровими картами маршруту. Такі схеми будемо для скорочення позначати 2+1. Кожна з цих додаткових систем має свої переваги та недоліки. Розглянемо надійність пілотажно-навігаційного обладнання, яке складається із ІНС, *GNSS*, радарів та оптичних систем. Такі схеми позначимо як 2+2.

Надійність системи із навантаженим резервуванням та експоненціальним законом ймовірності безвідмовної роботи елементів будемо визначати за формулою [39]:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}), \quad (1)$$

де $P_c(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи системи; λ_i – інтенсивності відмов елементів; $n=2+1$ або $n=2+2$.

На рис. 4 приведені графічні залежності ймовірності безвідмовної роботи систем для ІНС (крива P1), для ІНС та *GNSS* ($Pc2$ або $n=2$), для схем $n=2+1$ ($Pc3$) та $n=2+2$ ($Pc4$), якщо $\lambda_1=0,005$ 1/год; $\lambda_2=0,0075$ 1/год; $\lambda_3=0,008$ 1/год; $\lambda_4=0,0095$ 1/год;

З графіків видно, що надійність системи за схемою 2+2 вище надійності систем, побудованих за схемою 2+1. Для чисельної оцінки розглянемо середнє напрацювання системи до відмови [28]:

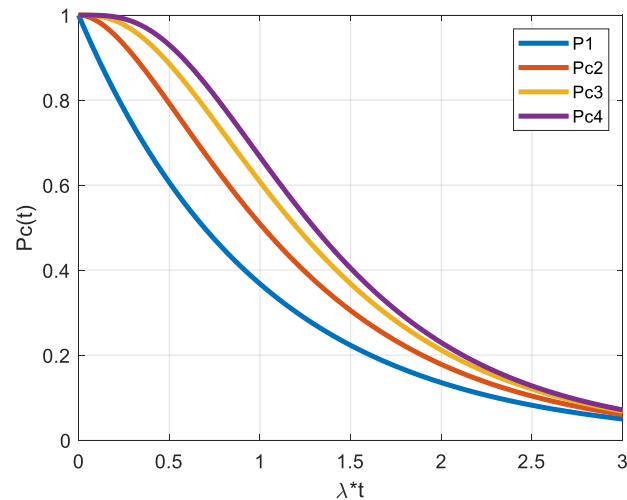


Рис. 4. Графічні залежності ймовірності безвідмовної роботи систем від часу

$$T_c = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} - \dots - \frac{1}{\lambda_{n-1} + \lambda_n} + \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \dots + \frac{1}{\lambda_{n-2} + \lambda_{n-1} + \lambda_n} + (-1)^{n+1} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \quad (2)$$

Якщо $T_1 = \frac{1}{\lambda_1}$, то розрахунок за формулою (2) дає, що $T_{c2} = 1,27T_1$ або збільшення на 27%; $T_{c3} = 1,81T_1$ або збільшення на 81%; $T_{c4} = 2,33T_1$ або збільшення на 133%. Отже, збільшення кратності резервування приводить до зростання середнього напрацювання системи до відмови.

Але, крім апаратурної надійності треба враховувати ще надійність інформаційну. Відомо, що комплексування (інтегрування) пілотажно-навігаційного обладнання використовують ще для корекції, або підвищення точності, однієї системи за рахунок інформаційної надлишковості.

Висновки

У сучасних військових і цивільних умовах БПЛА демонструють високий потенціал у виконанні критично важливих завдань, таких як розвідка, доставка вантажів, моніторинг і виконання ударних місій. У статті було розглянуто основні напрями підвищення функціональної ефективності БПЛА, серед яких:

- оптимізація маршрутів польоту: розглянуто алгоритми та методи, які дозволяють швидше та точніше вирішувати задачі планування польотів;

- підвищення кіберзахисту: розглянуто методи виявлення атак на навігаційні системи та захисту від спуфінгу, зокрема через використання підходів для виявлення аномалій у навігаційних даних;
- інтеграція штучного інтелекту (ШІ): представлено інноваційні підходи впровадження ШІ у безпілотники: генеративний дизайн, алгоритми керування роєм, комп'ютерний зір і методи інформаційно-екстремального навчання, що сприяють розширенню функціональних можливостей БПЛА;
- підвищення надійності: було запропоновано використання схеми 2+2, яка складається із ІНС, GNSS, радарів та оптичних систем для підвищення надійності пілотажно-навігаційного обладнання.

Однак, слід зазначити, що у науковій літературі існує досить мало робіт, присвячених аспектам надійності та відмовостійкості БПЛА, хоча ці питання є критично важливими для забезпечення стабільної та безпечної експлуатації, особливо в умовах автономного управління, де людське втручання обмежене або взагалі відсутнє. Тому, проведений огляд підтверджує необхідність поглиблених досліджень не лише у напрямку підвищення льотних характеристик БПЛА, але й у сфері забезпечення їх надійності та відмовостійкості. Надалі є перспективним розробка засобів і методів підвищення функціональної ефективності БПЛА, спрямованими на забезпечення більшої надійності шляхом ідентифікації потенційних причин відмов та розробки заходів для мінімізації ризиків та відмов.

Список використаної літератури

1. *Darintsev O. V., Migranov A. B., Yudincev B. S.* Neural network algorithm of planning trajectories for a group of mobile robots, *Artificial Intelligence ; Aviation technical university*, 2011, No. 1, p. 154–160.
2. *Wang N., Wang L., Go X., Chen L., Shen L.* Hopfield neural network guided evolutionary algorithm for aircraft penetration path planning, *Advances in neural network research and applications (LISEE, 67)*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010, p. 235–243.
3. *Subbotin S. A.* Building a fully defined neuro-fuzzy network with a regular partition of a feature space based on large sample, *Radio electronics, computer science, control*, 2016, No. 3, p. 47–53.
4. *Hopfield J. J., Brody C. D.* What is a Moment? Transient synchrony as a collective mechanism for spatiotemporal integration, *Proceedings of the NAS of the USA*, 2001, Vol. 98, No. 3, p. 1282–1287. DOI: 10.1073/pnas.98.3.1282.

5. Perdix fact sheet: Release of the Strategic capabilities office DoD. Access mode: <https://www.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/Perdix%20Fact%20Sheet.pdf>.
6. *Musiyenko M. P., Zhuravska I. M., Kulakovska I. V., Kulakovska A. V.* Simulation the behavior of robot sub-swarm in spatial corridors, Electronics and nanotechnology (ELNANO): 36th international conference, Kyiv, 19–21 Apr. 2016.
7. *Бережний А. О.* Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об'єктів. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології. Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, 2020.
8. *Журавська І. М.* Теоретичні основи, методи та засоби створення та функціонування швидкодинамічних гетерогенних комп'ютерних мереж критичного застосування. – Чорном. нац. ун-т ім. Петра Могили / Миколаїв – 2019.
9. *К. В. Мороз, М. В. Зайченко* Алгоритм планування траєкторії руху безпілотного літального апарата. Дослідження та розробки в галузі машинобудування, енергетики та управління: матеріали XXIV Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих учених, 25–26 квіт. 2024: о 2 ч. Ч. 2, 2024. – С. 49-51.
10. *Журавська І.* Гетерогенні комп'ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БПЛА: монографія. – Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2019. –192 с.
11. *Малишева Ю. О.* Інтегрована система навігації та орієнтації літального апарату з оптичними приладами. НТУУ «Київський Політехнічний Інститут» Київ – 2016 URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/18182>.
12. *Semanjski S., Semanjski I., Wilde W. D., Gautama S.* Use of supervised machine learning for GNSS signal spoofing detection with validation on real-world meaconing and spoofing data – Part II. Sensors. 2020. № 20(7):1806. p. 1-15.
13. *Kwon K.-C., Shim D.-S.* Performance analysis of direct GPS spoofing detection method with AHRS/Accelerometer. Sensors. 2020. № 20(4):954.
14. *Wan W., Kim H., Hovakimyan N., Sha L., Voulgaris P. G.* A Safety Constrained Control Framework for UAVs in GPS Denied Environment. 59-th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). Korea (South). 2020. p. 214-219.

15. *Seo S.-H., Lee B.-H., Im S.-H., Jee G.* Effect of spoofing on unmanned aerial vehicle using counterfeited GPS signal. *Journal of Positioning Navigation and Timing*. 2015. № 6. p. 57-65.
16. *Shepard D., Humphreys T., Fansler A.* Evaluation of the vulnerability of phasor measurement units to GPS spoofing attacks. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2012. № 5(3-4). p. 146-153
17. *Jansen K., Schäfer M., Moser D., Lenders V., Pöpper C., Schmitt J.* Crowd-GPS-sec: Leveraging crowdsourcing to detect and localize GPS spoofing attacks. *Proc. IEEE Symp. Security Privacy (SP)*. San Francisco. CA. USA: IEEE. 2018. p. 1018-1031.
18. *Головко М. А.* Методи виявлення атак на систему навігації БПЛА. Частина 2 / М. А. Головко; наук. керівник к. т. н., доц. Д. Ю. Горелов // *Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті : матеріали 28-го Міжнар. молодіж. форуму, 16–18 квітня 2024 р. – Харків : ХНУРЕ, 2024. – Т. 3. – С. 279–280.*
19. Пат. 124366 Україна, Спосіб навігації безпілотного літального апарата з захистом від перехоплення керування і система для його здійснення / Ю. Є. Хорошайло, та ін. – № а 201912084; заявл. 20.12.2019 ; опубл. 01.09.2021, Бюл. № 35. – 9 с.: іл.
20. *J. Bright, R. Suryaprakash, S. Akash та A. & Giridharan,* «Optimization of quadcopter frame using generative design and comparison with DJI F450 drone frame,» в *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021.
21. *Y. Kryvenchuk, D. Petrenko, D. Cichoń, Y. Malynovskyi та T. Helzhynska,* «Selection of Deep Reinforcement Learning Using a Genetic Algorithm,» в *6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (COLINS 2022)*, Gliwice, Poland, 12–13 May 2022.
22. *Petrenko, Y. Kryvenchuk та V. Yakovyna* «Enhancing Data Discretization for Smoother Drone Input Using GAN-Based IMU Data Augmentation» *Drones*, т. 7, № 7, p. 463, 2023.
23. *J. A. Cocoma-Ortega та J. Martinez-Carranza,* «A cnn based drone localisation approach for autonomous drone racing,» в *11th International Micro Air Vehicle Competition and Conference*, 2019.
24. *L. Zheng, G. Xu та W. Chen,* «Using Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Location Problem of Drone Logistics Hub,» в *Computers, Materials & Continua*, 2024.
25. *Bogrybayeva, T. Yoon, H. Ko, S. Lim, H. Yun та C. Kwon* «A deep reinforcement learning approach for solving the traveling salesman problem

- with drone,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, № 148, p. 103981, 2023.
26. *О. В. Самойленко, П. А. Глущенко, П. Б. Волохівський* Завдання та обрис алгоритмів штучного інтелекту в системах бортового обладнання перспективних безпілотних авіаційних комплексів. Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, 2023.
27. *Мироненко М. І.* Моделі і методи інформаційної технології машинного навчання автономного безпілотного літального апарату для відеомоніторингу місцевості : автореферат дис. д-ра філософії: 122. Суми, 2023. 222 с.
28. *Аврутов, В. В.* Надійність і діагностика приладів і систем: підручник /В.В. Аврутов, Н.І. Бурау, Г.А. Богдан – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 190 с.