

Аналіз вимог до навігаційного забезпечення безпілотного авіаційного комплексу під час виконання завдань у несприятливих умовах

Безпілотні авіаційні комплекси (БпАК) широко застосовуються для оптимізації процесів діяльності людства. У статті розглядається застосування БпАК під час виконання завдань у несприятливих умовах, що визначаються ускладненнями у вигляді природних, техногенних та інформаційних чинників. На основі аналізу наявного досвіду використання БпАК визначено проблемні питання їх застосування в несприятливих умовах. Для вирішення невідповідності між вимогами до виконання завдань БпАК у несприятливих умовах та наявним методичним, апаратним і програмно-алгоритмічним забезпеченням застосування БпАК проведено аналіз існуючих підходів реалізації навігаційного забезпечення. Визначено їхні недоліки в контексті використання в несприятливих умовах. На основі проведеного аналізу побудовано функціональну модель навігаційного забезпечення та запропоновано низку вимог, спрямованих на підвищення ефективності та оперативності виконання завдань. Зокрема, вимога можливості коригування траєкторії руху безпілотного повітряного судна (БПС) на основі оперативних даних, отриманих під час польоту, дозволить знизити ймовірність втрати або пошкодження БПС. Розв'язання розрахункових навігаційних завдань в умовах обмежених обчислювальних можливостей бортового комп'ютера дасть можливість забезпечити автономність БПС та знизити затримки, пов'язані з транспортуванням даних по каналах зв'язку до зовнішніх обчислювальних вузлів. Висувається вимога до виконання приземлення БПС в несприятливих умовах для зменшення впливу людського фактора, витрат на додаткове обладнання та підвищення оперативності приземлення. Розробка навігаційного забезпечення відповідно до сформованих вимог дозволить покращити оперативність та ефективність виконання завдань, покладених на БпАК в несприятливих умовах.

Ключові слова: навігаційне забезпечення; безпілотний авіаційний комплекс; безпілотне повітряне судно.

Актуальність теми. На сучасному етапі технологічного розвитку безпілотні повітряні судна (БПС) у складі безпілотних авіаційних комплексів (БпАК) широко застосовуються для виконання завдань дистанційного зондування, моніторингу, координації дій, доставки вантажів. БпАК сприяють оптимізації процесів у сільському та лісовому господарстві, промисловості, в гірничодобувній та в оборонній галузі [10]. Завдяки корисному навантаженню БПС у вигляді камер та датчиків стає можливим точне відстеження стану сільськогосподарських культур, покращується контроль зрошення та удобрення. БПС використовують для інспекції стану важкодоступних місць важливої інфраструктури. Дані системи застосовуються в моніторингу стану навколишнього середовища для збору даних [3].

Важливим полем застосування БпАК є виконання покладених на них завдань у несприятливих умовах. Під несприятливими умовами маються на увазі такі умови польоту, в яких виконання завдань, покладених на БПС, ускладнене природними, техногенними чи інформаційними чинниками. До природних чинників належать погодні умови; природні явища, особливості рельєфу, рослинність.

Результати діяльності людства виокремлюються в техногенні чинники. До них зараховують будівлі, конструкції, інфраструктурні об'єкти, обладнання та радіоелектронне випромінювання.

Інформаційні чинники виражаються в недостатності або відсутності інформаційного забезпечення про місцевість, в якій буде відбуватися виконання завдань.

Прикладом несприятливих умов є виконання завдань під час ліквідації наслідків природних лих, техногенних катастроф та інших надзвичайних ситуацій.

Досвід застосування БпАК доводить, що такі системи сприяють оптимізації процесів діяльності людства. Завдяки розвитку програмного та апаратного забезпечення стало можливим створення автономних БПС. Їхньою основною перевагою є те, що вони здатні виконувати поставлені завдання з мінімальним залученням оператора, що своєю чергою підвищує ефективність виконання завдань та зменшує ризики та витрати, пов'язані з людським фактором [3]. Застосування автономних БПС дозволить підвищити ефективність та оперативність виконання завдань у несприятливих умовах. Важливим компонентом, який безпосередньо впливає на якість виконання завдань автономними БПС, є навігаційне забезпечення. Більшість систем навігації автономних БПС покладаються на глобальні системи позиціонування (ГСП) для орієнтації в просторі, однак в несприятливих умовах ці системи не гарантують коректність роботи або ж можуть бути недоступними для використання. Згідно з [7; 8, с. 44], похибка

позиціонування з використанням загальнодоступної служби позиціонування (SPS GPS) становить до 9,7 метра. ГСП не можуть забезпечити необхідної точності позиціонування БПС, що не дозволяє покладатися на них під час виконання завдань у несприятливих умовах. Тому проблема, яка потребує розв'язання, це невідповідність між вимогами до виконання завдань БпАК в несприятливих умовах та наявним методичним, апаратним і програмно-алгоритмічним забезпеченням застосування БпАК.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Використання автономних БПС націлене на виконання специфічних завдань. Автори [6] розробили систему для екстреної доставки, де автономні БПС виконують доставку критично необхідних вантажів людям, які їх потребують. Система містить необхідну інфраструктуру для надання можливості виклику допомоги у вигляді клієнтського мобільного додатка та адміністративної панелі керування. Коли на адміністративну панель приходить запит на допомогу, відправляються інструкції автономному БПС і ініціюється процес доставки. Варто зауважити, що реалізована система навігації БПС повністю покладається на ГСП, тому якщо в місці призначення доставки ГСП будуть недоступними або працюватимуть з перебоями, то доставка критично необхідного вантажу не відбудеться. Точність виконання доставки є найвищою, коли допустимий радіус відхилення від точки призначення знаходиться в межах 5–7 метрів, в такому разі середнє відхилення фактичного розташування вантажу після доставки від точки призначення лежить в межах 1,86–5 метрів. Для передачі вантажу тому, хто його потребує, авторами розроблено систему скиду і обладнано нею експериментальний БПС. Це означає, що система не надає можливостей для точної доставки вантажу, адже, крім похибки позиціонування самого БПС, є ймовірність впливу на вантаж вітру, що робить процес доставки менш передбачуваним. У несприятливих умовах ситуація в зоні призначення динамічно змінюється, тому скидання вантажу замість приземлення БПС має ризик пошкодити наявне обладнання та сам вантаж.

У [2] дослідники розробили систему для доставки вантажів в умовах надзвичайної ситуації з використанням автономного БПС. Для позиціонування та навігації використовуються дані ГСП. Під час входження в зону доставки БПС зменшує висоту польоту та виконує скид вантажу, що зменшує вплив вітру на точність доставки. Однак ця система не може ефективно використовуватися в несприятливих умовах, оскільки залежність від ГСП унеможливорює її використання в місцевості, де ці системи недоступні. Наведені в дослідженні результати експериментального польоту не дозволяють зробити висновки про точність дотримання запланованої траєкторії та виконання маневру для здійснення доставки через коротку протяжність (400 метрів) польоту. В роботі не враховується можливість появи об'єктів у зоні зменшення висоти, що також збільшує ризик пошкоджень БПС.

У [4] висвітлюється метод навігації, незалежний від ГСП, який базується на візуальній одометрії та використанні супутникових або аерофотознімків для визначення та коригування позиції БПС. Принцип роботи системи полягає в тому, що при втраті сигналу ГСП, БПС починає використовувати візуальну навігацію. Візуальна одометрія працює з вхідними зображеннями з відеокамери БПС та вираховує зміну позиції шляхом відстеження характеристик точок, обраних за певними критеріями, з двох послідовних кадрів. Таким чином вираховується зміна позиції БПС відносно осей X та Y. Для визначення зміни позиції по осі Z використовуються дані з барометричного датчика. Паралельно з візуальною одометрією працює модуль, який зіставляє отримувані зображення з камери БПС з попередньо завантаженими аерофото- та супутниковими знімками з геоприв'язкою. Після проведення випробувального польоту довжиною 1 кілометр похибка позиції в кінці шляху склала 3 метри. Така система має потенціал застосування при польотах БПС в несприятливих умовах, проте має декілька недоліків. Під час польотів над місцевістю з невеликою кількістю відокремлених об'єктів, наприклад, над полями або лісами. Тоді запропонований алгоритм зіставлення зображень даватиме поправки позиції з меншою ймовірністю і похибка позиціонування зростатиме, бо виходячи з результатів експериментів, зазначених в роботі, позиціонування з використанням лише інерційної навігаційної системи та візуальної одометрії відбувається з суттєвою похибкою. Іншим недоліком є те, що покриття певних місцевостей аерофотознімками або супутниковими знімками є недостатньо деталізованим або ж неактуальними, що теж призводитиме до похибок під час позиціонування. В контексті застосування в несприятливих умовах отримане відхилення від точки призначення в 3 метри є суттєвим і може призвести до втрати або пошкодження БПС під час виконання посадки. Також варто зауважити, що запропонована система не враховує можливості появи сторонніх об'єктів у зоні посадки, що може призвести до матеріально-технічних втрат.

Проблемними питаннями використання БпАК в несприятливих умовах є:

- використання навігаційного забезпечення на основі ГСП;
- відсутність алгоритмічного забезпечення для планування траєкторії БПС;
- недостатня точність виконання посадки;
- відсутність адаптації до динамічного середовища в зоні посадки.

Невирішеними питаннями є забезпечення навігації в умовах недоступності ГСП та виконання точної посадки БПС з урахуванням динамічної зміни обстановки в місці призначення.

Метою статті є визначення вимог до навігаційного забезпечення БпАК для виконання завдань у несприятливих умовах.

Викладення основного матеріалу. Під навігацією в широкому сенсі розуміють слідування рухомого об'єкта заданій траєкторії відповідно до визначеної програми руху. Під навігацією у вузькому сенсі розуміють визначення і обрахунок параметрів руху, які необхідні для розв'язання задачі навігації в широкому сенсі.

Навігаційна система в загальному випадку (рис. 1) складається з набору датчиків, дані з яких потрапляють в обчислювальну систему. На основі цих даних визначаються координати об'єкта, його швидкість та прискорення.

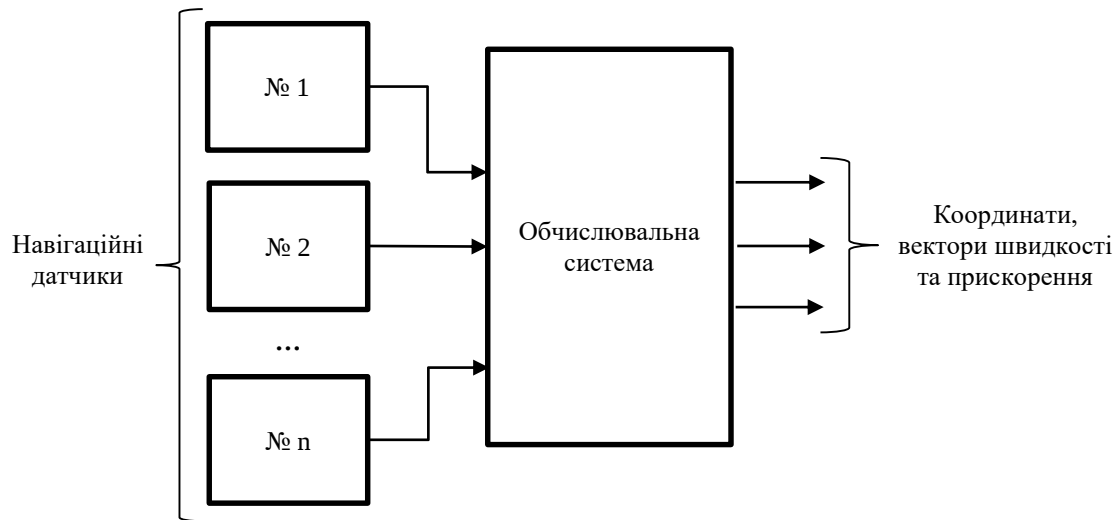


Рис. 1. Схема навігаційної системи

Навігаційне забезпечення БпАК працює за такою ж схемою. Для успішного виконання запланованого завдання БПС повинно володіти інформацією про своє місцезнаходження, швидкість, напрямок руху, а також початкову точку та місцезнаходження цілі [1]. Однак для підвищення ефективності виконання завдань у несприятливих умовах його функціональні можливості повинні бути розширені. Крім визначення положення БПС в просторі, навігаційне забезпечення БпАК повинно забезпечувати виконання ряду завдань, таких як побудова маршруту, контроль дотримання маршруту та контроль виконання приземлення. Функціональну модель навігаційного забезпечення БпАК для виконання завдань в несприятливих умовах зображено на рисунку 2.

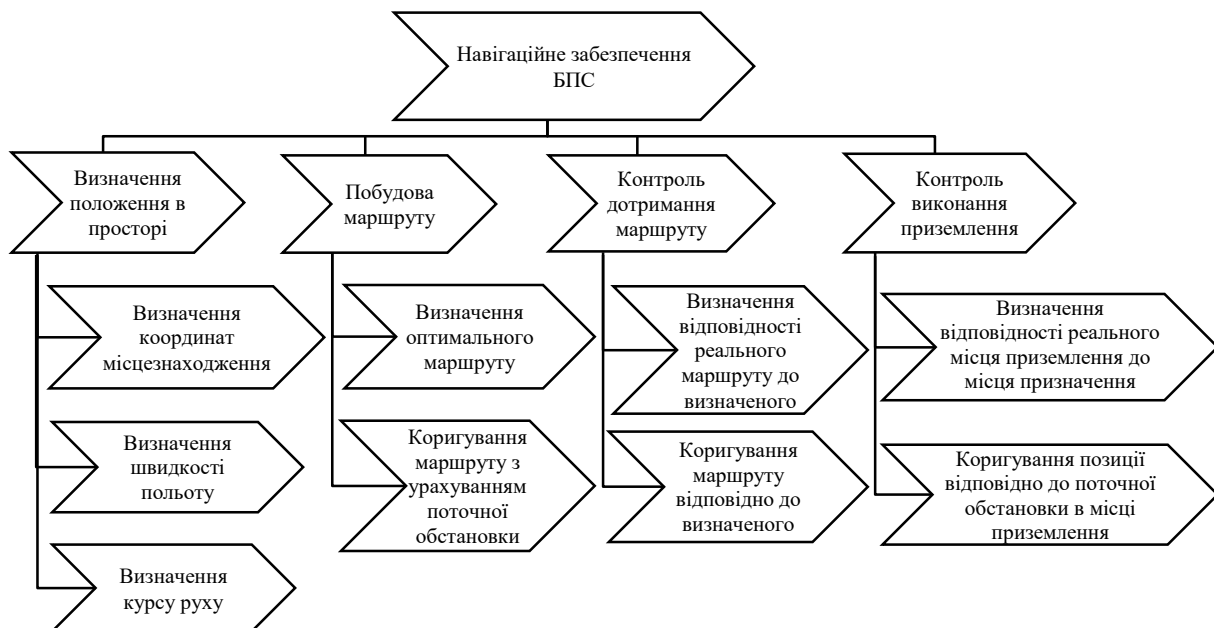


Рис. 2. Функціональна модель навігаційного забезпечення БпАК

Завдання виконання польоту БПС в складі БпАК складається з двох підзавдань:

- переміщення з початкової точки до точки призначення вздовж визначеного маршруту;
- приземлення в місці призначення.

Вирішення завдання переміщення БПС з початкової точки до точки призначення в несприятливих умовах потребує планування траєкторії польоту. Враховуючи потенційні ускладнення у вигляді природних, техногенних та інформаційних чинників, планування траєкторії польоту має відбуватися з урахуванням цих чинників. Зазвичай перед початком польоту БПС оператори виконують планування траєкторії польоту на основі наявного інформаційного забезпечення про місцевість, в якій мають виконуватися завдання. Однак такий підхід не є оптимальним, адже вимагає більше часу на виконання, має ризик не врахувати всі наявні дані або отримати хибні висновки про умови виконання завдань. Особливо важливим в несприятливих умовах, наприклад, під час ліквідації надзвичайної ситуації, є час, затрачений на планування, тому що виконання завдань має відбуватися з високою оперативністю. Тому для підвищення ефективності планування траєкторії руху БПС навігаційне забезпечення БпАК повинно виконувати планування траєкторії руху на основі наявної інформації в автоматизованому режимі.

Зважаючи на те, що під час виконання завдань у несприятливих умовах інформаційне забезпечення може бути неповним або відсутнім, після початкового планування траєкторії руху до початку польоту, БпАК має змогу отримати нові дані про середовище через сенсори і датчики, які розташовані на БПС. Таким чином, навігаційне забезпечення БпАК повинно забезпечувати коригування траєкторії руху з отриманням нових даних про середовище. Цілком імовірною є ситуація, коли інформація про місцевість виконання завдань не відповідає реальній ситуації через розміщення тимчасових габаритних об'єктів. Тоді навігаційне забезпечення, отримавши дані про них, повинне зреагувати на це та провести адаптацію траєкторії. Таким чином вдасться отримати більш безпечну траєкторію польоту та мінімізувати ризики втрати чи пошкодження БПС.

Важливим аспектом планування траєкторії польоту БПС є швидкість обрахунку та коригування траєкторії після отримання нових даних про середовище. Для цього важливо мінімізувати будь-які затримки, пов'язані з транспортуванням отриманих даних та забезпечити проведення розрахунків після початку польоту безпосередньо на бортовому апаратному забезпеченні. Таким чином вдасться запобігти затримкам, що пов'язані з передаванням, отриманням та обробкою даних. Також слід враховувати, що під час виконання завдань у несприятливих умовах канали зв'язку між наземною станцією та БПС можуть бути недоступними через вплив природних та техногенних чинників. Тому в цьому випадку програмно-алгоритмічне забезпечення планування траєкторії повинно ефективно працювати в умовах обмежених обчислювальних можливостей бортового апаратного забезпечення.

Під час планування польотів БПС слід враховувати обмеженість часу та дальності польоту, яка пояснюється обмеженою кількістю енергії, доступної для виконання маневрів. Зважаючи на це, при розрахунку траєкторії польоту БПС важливо забезпечувати енергоефективність траєкторії. Під час виконання завдань у несприятливих умовах важливо ефективно використовувати наявні ресурси, тому планування траєкторії БПС має виконуватися з урахуванням енергоефективності дотримання генерованої траєкторії.

Особливо важливим етапом польоту автономного БПС є кінцева ділянка маршруту, де має виконуватися приземлення. Наразі основними підходами для виконання точного приземлення є використання додаткових механізмів для перехоплення БПС [5] та спеціальних зображень, які є маркерами для приземлення [9]. Проте згадані вище підходи мають недоліки, що не дозволяють їх ефективно застосовувати у несприятливих умовах. Використання додаткових механізмів для перехоплення БПС вимагає додаткового часу на їхнє розгортання та залучення людини до цього процесу. Також використання таких механізмів може бути неможливим під час виконання завдань на обмежених площах. Використання спеціальних зображень у місцях приземлення БПС є більш доступним у контексті виконання завдань у несприятливих умовах. Розмістити зображення в місці посадки вимагає менше часу та зусиль. Однак в несприятливих умовах неможливо гарантувати постійну видимість зображення через постійну зміну обстановки, наприклад, зображення може перекрити спеціальне обладнання або транспорт. Також не варто виключати людський фактор, коли майданчик з маркером для посадки не буде розгорнутий вчасно.

Відповідно до функціональної моделі, яку зображено на рисунку 2, навігаційне забезпечення БПС має виконувати контроль виконання приземлення. У несприятливих умовах завдання приземлення ускладнюється динамічною зміною обстановки в місці призначення, недоступністю або деградацією сигналів ГСП, умовами погіршеної видимості. Задля зменшення впливу людського фактора, зменшення матеріальних витрат на обладнання та підвищення оперативності, виконання приземлення в несприятливих умовах має відбуватися з використанням даних про місце посадки, отриманих за допомогою датчиків БПС в реальному часі.

У результаті аналізу сучасного стану використання БпАК сформовано вимоги, які має задовольняти навігаційне забезпечення БпАК, для підвищення ефективності виконання завдань у несприятливих умовах:

- планування траєкторії польоту в умовах недостатнього або відсутнього інформаційного забезпечення з урахуванням природних та техногенних чинників на етапі підготовки до польоту;
- можливість коригування траєкторії на основі оперативних даних, отриманих під час польоту;
- розв'язання розрахункових навігаційних завдань в умовах обмежених обчислювальних можливостей бортового комп'ютера;
- забезпечення енергоефективності траєкторії;
- виконання точного і безпечного приземлення в умовах динамічної зміни обстановки на основі оперативних даних, отриманих під час польоту.

Навігаційне забезпечення, розроблене з дотриманням зазначених вимог, дозволить підвищити ефективність та оперативність виконання завдань у несприятливих умовах.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Ефективність виконання завдань, покладених на БпАК в несприятливих умовах, залежить від навігаційного забезпечення. У ході дослідження виявлено невідповідність між вимогами до виконання завдань БпАК в несприятливих умовах та наявним методичним, апаратним і програмно-алгоритмічним забезпеченням застосування БпАК.

Сформовано низку вимог до навігаційного забезпечення, що спрямовані на покращення ефективності виконання завдань у несприятливих умовах. Можливість коригування траєкторії руху БПС на основі оперативних даних, отриманих під час польоту, дозволить реагувати на динамічні перешкоди в середовищі та знизити ймовірність пошкодження або втрати БПС під час виконання завдань. Важливою вимогою є розв'язання розрахункових навігаційних завдань в умовах обмежених обчислювальних можливостей бортового комп'ютера. Це дозволить уникнути залежності від зовнішніх обчислювальних вузлів, зменшити затримки, пов'язані з транспортуванням та отриманням даних, забезпечить автономність БПС. Суттєво вплине на ефективність виконання завдань у несприятливих умовах виконання точного і безпечного приземлення в умовах динамічної зміни обстановки на основі оперативних даних, отриманих під час польоту. Таким чином буде зменшено вплив людського фактора, зменшено витрати на додаткове обладнання та підвищено оперативність виконання приземлення.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку програмно-алгоритмічного забезпечення планування траєкторії руху та контролю виконання посадки БПС в несприятливих умовах.

References:

1. Lu, Y., Xue, Z., Xia, G.-S. and Zhang, L. (2018), «A survey on vision-based UAV navigation», *Geo-spatial information*, Vol. 21 (1), pp. 21–32, doi: 10.1080/10095020.2017.1420509.
2. Ashish, M., Muraleedharan, A., Cm, S. et al. (2020), «Autonomous payload delivery using hybrid VTOL uavs for community emergency response», *2020 IEEE international conference on electronics, computing and communication technologies (CONECCT)*, Bangalore, India, doi: 10.1109/conecct50063.2020.9198490.
3. Katkuri, A.V.R., Madan, H., Khatri, N. et al. (2024), «Autonomous UAV navigation using deep learning-based computer vision frameworks: a systematic literature review», *Array*, doi: 10.1016/j.array.2024.100361.
4. Conte, G. and Doherty, P. (2008), «An integrated UAV navigation system based on aerial image matching», *2008 IEEE aerospace conference*, pp. 1–10, doi: 10.1109/AERO.2008.4526556.
5. Liu, C., Jiang, Z., Xu, R. et al. (2022), «Design and optimization of a magnetic catcher for UAV landing on disturbed aquatic surface platforms», *2022 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, Philadelphia, PA, USA, doi: 10.1109/icra46639.2022.9812270.
6. Wenjian, Z., Sidong, Z., Rongjie, C. et al. (2020), «Design of a relief materials delivery system based on UAV», *Materials science and engineering*, IOP conference, doi: 10.1088/1757-899x/715/1/012049.
7. Naval Meteorology and Oceanography Command, «Global positioning system overview», [Online], available at: <https://www.cnmc.usff.navy.mil/Our-Commands/United-States-Naval-Observatory/Precise-Time-Department/Global-Positioning-System/Global-Positioning-System-Overview/>
8. The United States Department of Defense (2020), «Global positioning system standard positioning service performance standard», The United States Department of Defense, Washington, [Online], available at: <https://www.navcen.uscg.gov/sites/default/files/pdf/gps/geninfo/2020SPSPPerformanceStandardFINAL.pdf>
9. Sani, M.F., Shoaran, M. and Karimian, G. (2019), «Automatic landing of a low-cost quadrotor using monocular vision and Kalmanfilter in GPS-denied environments», *Turkish journal of electrical engineering & computer sciences*, Vol. 27, No. 3, pp. 1821–1838, doi: 10.3906/elk-1809-204.
10. Nex, F., Armenakis, C., Cramer, M. et al. (2022), «UAV in the advent of the twenties: where we stand and what is next», *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, Vol. 184, pp. 215–242, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006.

Ковбасюк Сергій Валентинович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0002-6003-7660>.

Наукові інтереси:

- системні космічні дослідження в сфері національної безпеки та оборони;
- удосконалення й розроблення методів, способів і засобів космічної ситуаційної обізнаності;
- застосування (використання) космічних систем і технологій.

Українець Микола Олександрович – аспірант Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0009-0002-1185-491X>.

Наукові інтереси:

- автономні транспортні засоби;
- комп'ютерний зір;
- штучний інтелект.

Kovbasiuk S.V., Ukrainets M.O.

**Analysis of requirements for navigation of an unmanned aircraft complex when performing tasks
in adverse conditions**

Unmanned aircraft complexes (UAC) are widely used to optimize human activities. The article considers the usage of UACs when performing tasks in adverse conditions, which are determined by complications in the form of natural, man-made and informational factors. Problematic questions of the usage of UACs in adverse conditions were identified based on the experience of UACs usage. In order to solve the inconsistency between the requirements for performing UAC tasks in adverse conditions and the available methodological, hardware, and software and algorithmic support for UAC application, an analysis of existing approaches of implementing navigation was conducted. Their drawbacks in the context of use in adverse conditions have been identified. Based on the analysis, a functional model of navigation was built and a number of requirements aimed at increasing the efficiency of task performance were proposed. In particular, the requirement to provide the ability to adjust the trajectory of the unmanned aerial vehicle (UAV) based on the data received during the flight will reduce the probability of UAV loss or damage. The ability to solve navigation tasks in conditions of limited computing capabilities of the on-board computer will ensure the autonomy of the UAV and reduce delays associated with transporting data over communication channels to external computing nodes. There is a requirement to perform an UAV landing in adverse conditions to reduce the impact of the human factor, costs for additional equipment, and increase the efficiency of the landing. The development of navigation support in accordance with the proposed requirements will improve the efficiency and effectiveness of performing UAC tasks in adverse conditions.

Keywords: navigation; unmanned aircraft complex; unmanned aerial vehicle.

Стаття надійшла до редакції 01.09.2025.