

О.Є. ВОЛКОВ

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, Київ, Україна, e-mail: *Alexvolk@ukr.net*.

М.М. КОМАР

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, Київ, Україна, e-mail: *nickkomar08@gmail.com*.

Д.А. РАЧКОВСЬКИЙ

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, Київ, Україна, e-mail: *dar@infrm.kiev.ua*.

Д.О. ВОЛОШЕНЮК

Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, Київ, Україна, e-mail: *p-h-o-e-n-i-x@ukr.net*.

ТЕХНОЛОГІЯ АВТОНОМНОГО ЗЛЬОТУ ТА ПОСАДКИ ДЛЯ СУЧАСНОГО НАВІГАЦІЙНО-ПІЛОТАЖНОГО КОМПЛЕКСУ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

Анотація. Розроблено технологію автономного зльоту та посадки безпілотного літального апарата. Метою роботи є підвищення ефективності виконання завдань, які стоять перед безпілотною авіацією. Показано, що застосування запропонованої технології дасть змогу значно підвищити автономність виконання зльоту та посадки з широкого діапазону початкових умов. Продемонстровано, що розроблена технологія не передбачає складних маневрів для посадки безпілотного літального апарата. Перевагою технології є здатність працювати з поширеними типами сучасних автопілотів.

Ключові слова: автономність, зліт, посадка, безпілотний літальний апарат, ATOL, керування.

ВСТУП. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Останнім часом широкого розповсюдження набув такий клас рухомих об'єктів, як безпілотні літальні апарати (БПЛА). Оснащення БПЛА сучасними типами сенсорів дало змогу отримувати значні обсяги даних, що стосуються різних аспектів поточної ситуації. Впровадження потужних бортових комп'ютерно-комунікаційних систем забезпечило здатність до швидкого та якісного оброблення отриманої від сенсорів інформації [1]. Як результат були створені необхідні передумови для значного підвищення ефективності виконання польотів БПЛА завдяки побудові та впровадженню систем високоточного автоматичного керування.

Однією з особливостей сучасного БПЛА є здатність здійснювати автономне маневрування під час польоту за заданим маршрутом. Це дає змогу звільнити операторів, які знаходяться на наземних станціях керування, від необхідності безперервного контролю великої кількості параметрів руху. Натомість вони задають початкову, кінцеву та проміжні точки маршруту, а також декілька додаткових характеристик для польоту БПЛА. Решту параметрів обчислюють за допомогою засобів бортової системи керування та передають на відповідні органи керування.

Автономний політ безпілотного літального апарата складається з таких стадій: автоматичний зліт і посадка, обчислення траєкторії польоту та подальше витримування розрахованої траєкторії. Ці стадії поєднують з додатковими процесами вищого рівня прийняття рішень для виконання завдань, які можуть бути поставлені залежно від мети польотного завдання БПЛА.

© О.Є. Волков, М.М. Комар, Д.А. Рачковський, Д.О. Волошенюк, 2022

Процес виконання польоту будь-якого літального апарата має дві стадії, які характеризуються як інтенсивним маневруванням, так і обмеженістю ресурсів керування для досягнення деяких термінальних станів [2].

Кожен політ БпЛА, що проходить у штатному режимі, супроводжується такими невід'ємними стадіями, як запускання (зліт) і посадка. Стадії зльоту та посадки характеризуються підвищеною складністю, як під час посадки за допомогою оператора, так і під час посадки в автоматичному режимі.

Метою статті є підвищення ефективності виконання завдань, які стоять перед безпілотною авіацією, шляхом розроблення технології автономного зльоту та посадки безпілотного літального апарата.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Нині розробленню та впровадженню методів зльоту та посадки БпЛА приділяють значну увагу. Є декілька основних способів зльоту БпЛА: запускання з рук, застосування катапульти, вертикальний зліт, зліт «по-літаковому» [3–6].

Запускання планера БпЛА за допомогою фізичної сили людини без спеціалізованих пристосувань здійснюється у випадку маси БпЛА менше 5 кг. Основною перевагою цього способу є простота, водночас основним недоліком є небезпека як для самого планера, так і для оператора на старті БпЛА.

На сьогодні значну кількість БпЛА запускають за допомогою катапульти. Проте цей метод має переваги, так і недоліки. Наприклад, порохова катапульта за всіх своїх позитивних характеристик (простота, надійність, енергоозброєність) має такі суттєві недоліки, як відсутність скритності роботи, підвищена небезпека для обслуговуючого персоналу. Порохова катапульта є практично незамінною під час запускання важких БпЛА з реактивним двигуном, але застосування її для запускання міні-БпЛА не є доцільним [6, 7].

Інший спосіб зльоту — це вертикальний зліт. Серед наявних БпЛА особливу, але поки нечисленну групу становлять БпЛА, які є апаратами вертикального зльоту та посадки. Ця здатність БпЛА не тільки суттєво спрощує проблему їхнього базування, а й розширює можливості БпЛА як за сферами застосування, так і з погляду тактики їхнього застосування. Під час проектування систем автоматичного керування цих БпЛА виникають труднощі у забезпеченні їхньої стабілізації відносно центру мас (особливо на режимі зльоту та зависання). До того ж під час вертикального зльоту відбувається велика витрата палива, що зумовлює скорочення радіуса застосування БпЛА [8].

Зліт «по-літаковому» можна здійснювати в автоматичному режимі або під керуванням наземного оператора.

Відомі способи посадки БпЛА [9, 10] можна звести до таких основних схем: посадка «по-літаковому» (на злітно-посадкову смугу); посадка «по-вертольотному» (на майданчик); посадка з використанням парашута; посадка в уловлювальні пристрої (горизонтально або вертикально розташовані сітки).

Для БпЛА літакового типу застосовують класичні системи посадки, які також використовують для посадки пілотованих літальних апаратів. Це, наприклад, курсо-глісадна система та системи посадки сантиметрового діапазону.

Зазвичай процес посадки розділяють на п'ять етапів: зниження, вирівнювання, витримування, приземлення, пробіг. Під час зниження відбувається наближення БпЛА до землі на безпечній швидкості. Етап вирівнювання слугує для погашення вертикальної швидкості зниження, під час якого БпЛА переводять у режим горизонтального польоту. На етапі витримування відбувається подальше погашення швидкості польоту на сталій висоті внаслідок збільшення коефіцієнта лобового

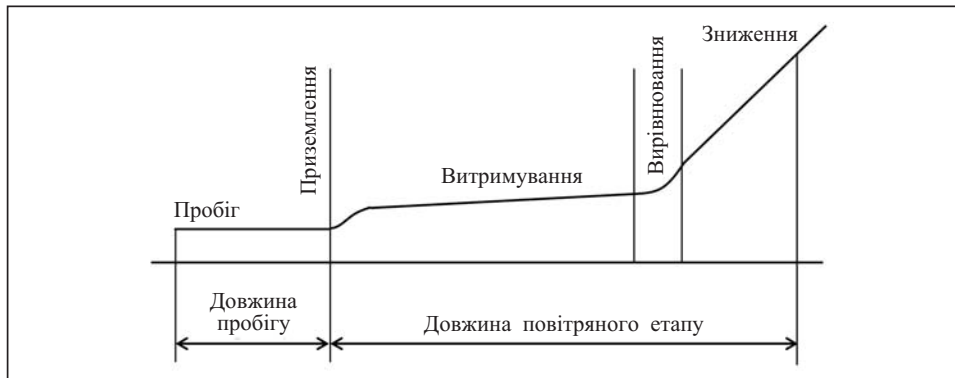


Рис. 1. Процес посадки

опору. Приземлення є процесом прямого контакту БПЛА колесами шасі з поверхнею землі після невеликого парашутування з висоти витримування. Під час пробігу в міру зменшення швидкості піднята під час приземлення передня або задня опора шасі опускається, що приводить БПЛА у стабільне положення (рис. 1).

Для того, щоб приземлити апарат у встановленому або наміченому місці, оператори виконують складні розрахунки для виконання маневру БПЛА за горизонталлю та вертикаллю під час виконання посадки [10].

У роботах [11–15] запропоновано методи для систем, які забезпечують автономний зліт та посадку БПЛА різних типів. Ці системи мають назву АТОЛ (Autonomous Take-Off and Landing). Зліт і посадка без втручання оператора значно спростять одночасне використання кількох апаратів. Функція автономного зльоту та посадки в майбутньому стане стандартною функцією в удосконаленій наземній системі керування БПЛА. Ця функція забезпечує мінімізацію помилок, зумовлених людським чинником, на етапах зльоту та посадки БПЛА, а також скорочення витрат на навчання операторів.

Слід зазначити, що основним недоліком неавтономних систем керування зльотом і посадкою БПЛА є низька точність їхньої роботи в умовах польоту у збуреній атмосфері. Запропонована технологія дає змогу успішно виконувати зліт та посадку в автономному режимі навіть за поганих погодних умов.

АВТОНОМНЕ КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ НА СТАДІЇ ЗЛЬОТУ

На стадії зльоту потрібно виконати розбіг у межах злітно-посадкової смуги (ЗПС) і набрати достатню висоту, зважаючи на вимоги норм льотної придатності або наявність перешкод по курсу польоту. З іншого боку, на кінцевому етапі посадки потрібно погасити швидкість до рівня, придатного для руління і безпечного завершення польоту БПЛА.

У контексті розробленої технології автономного зльоту БПЛА літакового типу процес зльоту умовно поділяють на три етапи (рис. 2).

I етап. Цей етап триває від початку розбігу по ЗПС до набору швидкості відриву $V_{to} = 30$ м/с. Під час цього етапу кут крену γ і тангажу ν БПЛА законами керування стабілізують у нульовому значенні до моменту відривання від ЗПС. Значення тяги встановлюють на злітне значення.

II етап. Початок етапу настає за досягнення БПЛА швидкості відриву $V_{to} = 30$ м/с. БПЛА відривається від ЗПС. При цьому встановлюють кут тангажу 5° . Керування кутом крену здійснюється для стабілізації курсу БПЛА (ψ), який на цьому етапі повинен дорівнювати курсу ЗПС ($\psi_{гв}$). Завершення етапу настає в разі досягнення висоти зльоту $V_{to} = 50$ м. Значення тяги зберігає злітне значення.

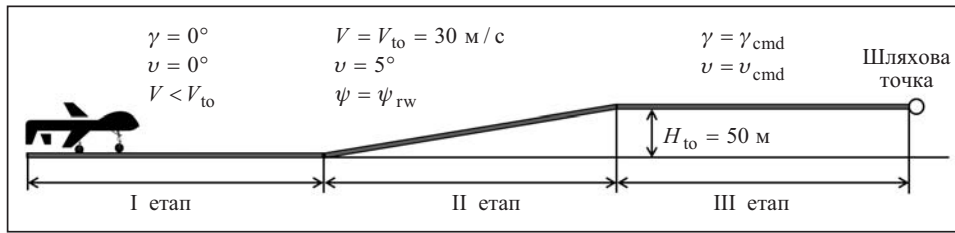


Рис. 2. Характерні точки на стадії зльоту БПЛА

III етап. Після досягнення висоти зльоту керування БПЛА здійснюється з використанням алгоритмів керування польотом БПЛА. А саме, керування висотою та швидкістю можна здійснювати методом керування повною енергією БПЛА, який виробляє сигнали керування кутом тангажу v_{cmd} і тягою двигуна δ_{th} . Керування траєкторним рухом можна виконувати за допомогою нелінійної логіки адаптивного керування кутом крену, яка працює в режимі польоту БПЛА за шляховими точками і виробляє сигнали керування кутом крену БПЛА (γ_{cmd}) [16].

АВТОНОМНЕ КЕРУВАННЯ БЕЗПЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ НА СТАДІЇ ПОСАДКИ

Будь-яка система посадки БПЛА, незалежно від реалізованого способу (схеми) посадки, повинна забезпечувати розв'язання двох завдань:

- завдання виведення БПЛА в задану точку (область) простору з необхідною точністю та заданими значеннями кутів орієнтації БПЛА, лінійних і кутових швидкостей (завдання термінального керування);
- завдання повного поглинання (гасіння) залишкової кінетичної енергії БПЛА зі збереженням його механічної цілісності.

Інструментальною базою, яку застосовують для отримання інформації під час посадки БПЛА літакового типу є звукові (сонари) та лазерні пристрої для вимірювання дальності й висоти, приймачі систем супутникової навігації, відеокамери (для візуального заходу на посадку, або для реалізації систем комп'ютерного зору, які дають змогу виконувати автоматичну посадку).

Розроблена технологія посадки БПЛА призначена для виконання посадки БПЛА в автономному режимі під час подавання у систему керування БПЛА команди заходу на посадку у будь-який час та на будь-якому проміжку траєкторії польоту. Значною відмінністю розробленої технології від описаних у [11–15] є те, що в ній для проведення розрахунку маневру на посадку до етапу вирівнювання БПЛА використано алгоритми, які застосовуються у найбільш поширених автопілотах [16]. Наприклад, керування висотою та швидкістю можна здійснювати методом керування повною енергією БПЛА, який виробляє сигнали керування кутом тангажу v_{cmd} і тягою двигуна δ_{th} . Керування траєкторним рухом можна виконувати за допомогою нелінійної логіки адаптивного керування кутом крену, яка виробляє сигнали керування кутом крену γ_{cmd} БПЛА.

Для виконання посадки в автономному режимі в автопілоті БПЛА створюють параметри віртуальної глісади, яка ґрунтується на координатах точки торця ЗПС, курсу ЗПС, значення висоти входу БПЛА у віртуальну глісаду h_{ge} та точки розвороту на курс ЗПС. Ці дані потрібні для забезпечення роботи алгоритмів керування БПЛА і формування посадкового курсу та віртуальної глісади БПЛА (рис. 3).

Додатково визначають такі точки:

- точку прийняття рішення про посадку — точку розташування БПЛА в момент отримання команди заходу на посадку (необхідну для забезпечення роботи нелінійної логіки адаптивного керування кутом крену);

- точку приземлення — точку на ЗПС, через яку проходить віртуальна глісада на відстані d від точки торця ЗПС. Відстань d обчислюють за формулою: $d = \frac{h_B}{\text{tg } \mu}$, де h_B — висота вирівнювання (висота над точкою торця ЗПС, на якій

починається етап вирівнювання БпЛА); μ — кут нахилу віртуальної глісади;

- глісадну точку — точку входу БпЛА у віртуальну глісаду, яка розташована на висоті h_{ge} віртуальної глісади.

У розробленій технології автономної посадки БпЛА використано такі параметри: $h_B = 3$ м, $\mu = 4^\circ$, $d = 42.9$ м.

Глісадна точка та точка розвороту формують проміжок, потрібний для забезпечення входу БпЛА до створу віртуальної глісади на заданій висоті h_{ge} з курсом ЗПС. Довжина цього проміжку є динамічною. Її вибирають, виходячи з вимог щодо часу здійснення посадки. Вона залежить від кута підходу БпЛА до ЗПС і його динамічних характеристик (чим більший кут підходу БпЛА до ЗПС, тим більша довжина проміжку, необхідного для завершення маневрів і зайняття курсу ЗПС). Проте ця величина має бути не меншою, ніж довжина, необхідна для виконання всіх маневрів для зайняття курсу ЗПС. Задана висота польоту БпЛА на цьому проміжку дорівнює висоті точки входження в глісаду h_{ge} .

Щоб не допустити викочування БпЛА за межі ЗПС або його посадки за межами ЗПС, алгоритм нелінійної логіки адаптивного керування кутом крену доповнено додатковим алгоритмом компенсації бокового розходження (після прольоту глісадної точки). Інакше кажучи, курс БпЛА коригують так, щоб він став паралельним осі ЗПС з мінімальним боковим відхиленням. У результаті роботи обох алгоритмів після прольоту глісадної точки БпЛА займає курс, який дає змогу залишатися на посадковій прямій без крену і ковзання.

На рис. 3 наведено схему траєкторного керування БпЛА. У цьому випадку БпЛА 1 і БпЛА 2 здійснювали політ заданою траєкторією за шляховими точками.

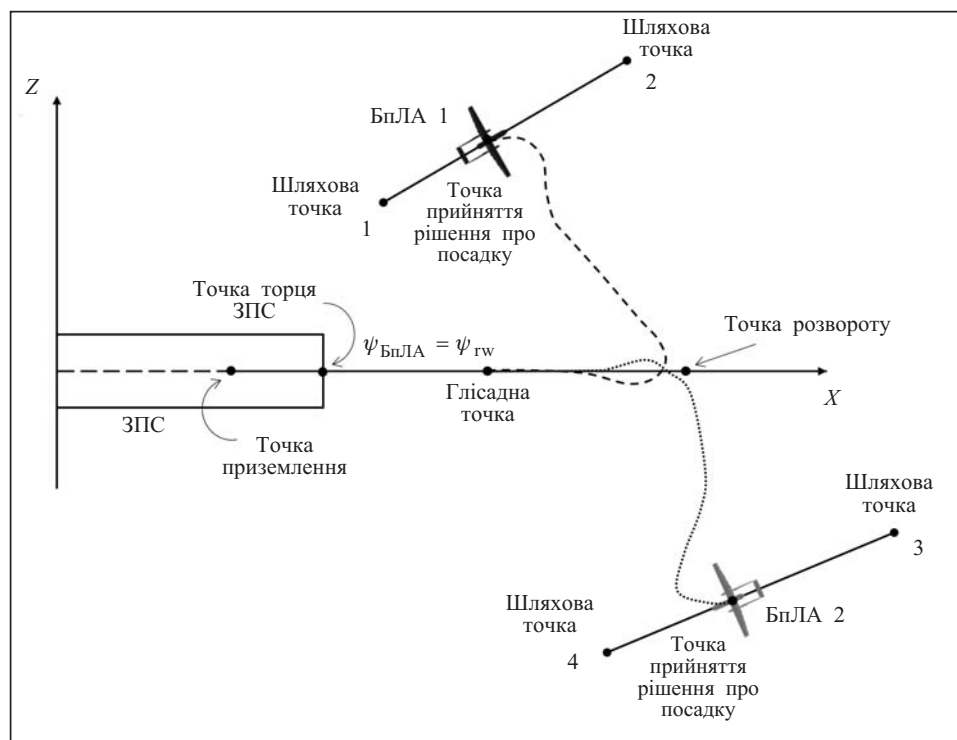


Рис. 3. Горизонтальна площина посадки БпЛА в автономному режимі

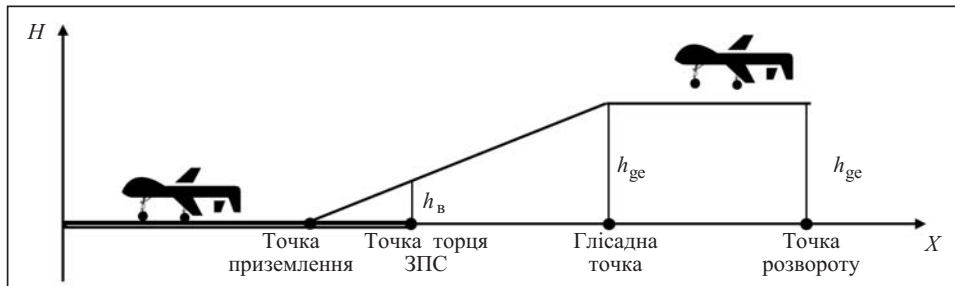


Рис. 4. Вертикальна площина стадії посадки БПЛА

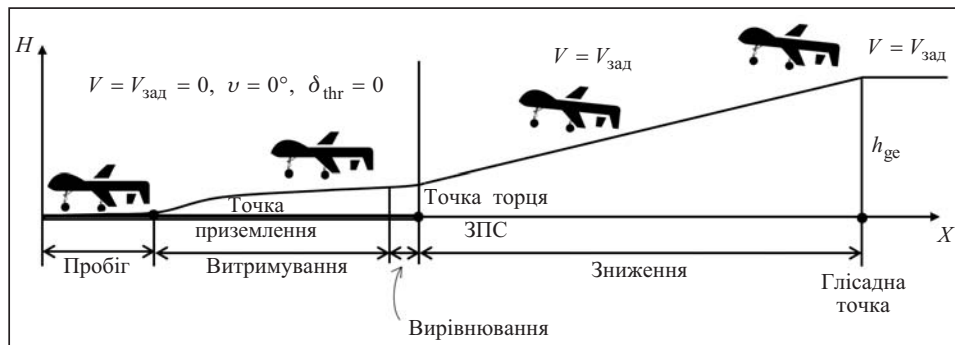


Рис. 5. Основні етапи і параметри БПЛА під час заходу на посадку

У момент прольоту шляхової точки 1 для БПЛА 1 і шляхової точки 3 для БПЛА 2 отримано команду на здійснення посадки. Пунктирними лініями показано нові автоматично розраховані в системі керування БПЛА траєкторії заходу на посадку, в яких наступною шляховою точкою вибирають точку розвороту.

Алгоритм нелінійної логіки адаптивного керування кутом крену починає спрямовувати БПЛА за умовною прямою від точки прийняття рішення про посадку до точки розвороту. На відстані 150 м відбувається перемикання шляхових точок і алгоритм спрямовує БПЛА від точки розвороту до глісадної точки з подальшим перемиканням шляхових точок від глісадної до точки приземлення.

У вертикальній площині контроль висоти та швидкості польоту БПЛА здійснюється методом керування повною енергією БПЛА. Відбувається спрямування БПЛА за всіма точками, починаючи від точки прийняття рішення про посадку, закінчуючи точкою приземлення (рис. 4). Вертикальна швидкість БПЛА залежить від його типу та динамічних характеристик. Політ БПЛА виконується із заданою посадковою швидкістю $V = V_{\text{зад}}$.

Після прольоту точки торця ЗПС алгоритм керування встановлює значення кута тангажу 0° і працює в режимі утримання цього значення, водночас тяга двигуна встановлюється на 0 ($\delta_{\text{thr}} = 0$). Задана швидкість польоту БПЛА після прольоту точки торця ЗПС набуває значення $V_{\text{зад}} = 0$ (рис. 5).

На етапі витримування через зростання лобового опору відбувається зменшення швидкості та висоти польоту, БПЛА торкається поверхні ЗПС, виконує етап пробігу та остаточну зупинку в межах ЗПС.

ВИСНОВКИ

Запропоновано технологію автономного зльоту та посадки безпілотного літального апарата. У разі застосування енергетичного підходу до керування польотом безпілотного літального апарата розроблена технологія дає можливість усунути такий недолік традиційних систем керування посадкою, як низька

точність їхньої роботи в умовах польоту у збуреній атмосфері. Критеріями керування у цьому підході є мінімум відхилення повної енергії руху безпілотно-го літального апарата від опорного значення, заданого віртуальною глісадою, і мінімізація дисбалансу між кінетичною і потенційною складовими повної енергії. Результати роботи дають змогу мінімізувати помилки, зумовлені людським чинником, на етапах зльоту та посадки. Завдяки цьому можна послабити вимоги до операторів та скоротити витрати на їхнє навчання. Напрямоком подальших досліджень є вдосконалення розробленої технології задля її застосування у випадку більшої кількості безпілотних літальних апаратів літакового типу та покращення її сумісності з більшою номенклатурою наявних автопілотів. Також автори мають на меті розглянути можливості інтелектуалізації технології за рахунок застосування розподіленого представлення даних [17–19], зокрема на основі випадкових проекцій [20–22].

У разі застосування розробленої технології зникає потреба у здійсненні складних маневрів для посадки безпілотно-го літального апарата. Вона також дає змогу значно підвищити автономність виконання посадки з широкого діапазону початкових умов, оскільки немає потреби в обов'язковій прив'язці до наземної інфраструктури аеродромів. Ця технологія суттєво розширює допустимі умови виконання штатних та нештатних посадок безпілотних літальних апаратів, що, у свою чергу, сприяє підвищенню гнучкості, ефективності та оперативності їхнього застосування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Volkov O., Komar M., Volosheniuk D. Devising an image processing method for transport infrastructure monitoring systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4, N 2(112). P. 18–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239084>.
2. Осипов Ю.М., Орлов С.В. Старт лёгких беспилотных летательных аппаратов. *Системы озброєння і військова техніка*. 2015. №. 3. С. 116–119.
3. Gu H., Lyu X., Li Z., Shen S., Zhang F. Development and experimental verification of a hybrid vertical take-off and landing (VTOL) unmanned aerial vehicle (UAV). *Proc. 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (13–16 June 2017, Miami, FL, USA). Miami, 2017. P. 160–169. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2017.7991420>.
4. Daibing Z., Xun W., Weiwei K. Autonomous control of running takeoff and landing for a fixed-wing unmanned aerial vehicle. *Proc. 2012 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)* (5–7 December 2012, Guangzhou, China). Guangzhou, 2012. P. 990–994. <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2012.6485292>.
5. Ładyżyńska-Kozdraś E., Sibilska-Mroziewicz A., Czubaj S., Falkowski K., Sibilski K., Wróblewski W. Take-off and landing magnetic system for UAV carriers. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2017. Vol. 16, Iss. 4. P. 298–304. <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1369720>.
6. Crowther W. Perched landing and takeoff for fixed wing UAV's. *Proc. RTO AVT Symposium on Unmanned Vehicles for Aerial, Ground and Naval Military Operations* (9–13 October 2000, Ankara, Turkey). Ankara, 2000. RTO MP-052. P. 19-1–19-10.
7. Xiong H., Li T., Li H., Yu C. A preliminary research on performance prediction model of catapult launched take-off for a large wingspan unmanned aerial vehicle. In: *Complex Systems Design & Management*. Krob D., Li L., Yao J., Zhang H., Zhang X. (Eds). Cham: Springer, 2021. P. 467–467. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73539-5_37.
8. Zou Y., Meng Z. Coordinated trajectory tracking of multiple vertical take-off and landing UAVs. *Automatica*. 2019. Vol. 99. P. 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.10.011>.
9. Klochan A.E., Al-Ammouri A., Abdulsalam H.I.S. Advanced UAV landing system based on polarimetric technologies. *Proc. 2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)* (17–19 October 2017, Kyiv, Ukraine). Kyiv, 2017. P. 147–150. <https://doi.org/10.1109/APUAVD.2017.8308796>.

10. Muskardin T., Balmer G., Persson L., Wlach S., Laiacker M., Ollero A., Kindak K. A novel landing system to increase payload capacity and operational availability of high altitude long endurance UAVs. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2017. Vol. 88, N 2. P. 597–618. <https://doi.org/10.1007/s10846-017-0475-z>.
11. Kügler M.E., Heller M., Holzapfel F. Automatic take-off and landing on the maiden flight of a novel fixed-wing UAV. *Proc. 2018 Flight Testing Conference (25–29 June 2018, Atlanta, Georgia, USA)*. Atlanta, 2018. P. 4275. <https://doi.org/10.2514/6.2018-4275>.
12. Steinleitner A., Frenzel V., Pfeifle O., Denzel J., Fichter W. Automatic take-off and landing of tailwheel aircraft with incremental nonlinear dynamic inversion. *Proc. AIAA SCITECH 2022 Forum (3–7 January 2022, San Diego, CA & Virtual, USA)*. San Diego, 2022. P. 1228. <https://doi.org/10.2514/6.2022-1228>.
13. Kügler M.E., Holzapfel F. Parameterization and computation of automatic take-off and landing trajectories for fixed-wing UAV. *Proc. 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (5–9 June 2017, Denver, Colorado, USA)*. Denver, 2017. P. 3421. <https://doi.org/10.2514/6.2017-3421>.
14. Rogalski T., Nowak D., Walek L., Rzońca D., Samolej S. Control system for aircraft take-off and landing based on modified PID controllers. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 252. P. 06008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925206008>.
15. Ramos F.J. Overview of UAS control stations. In: *Encyclopedia of Aerospace Engineering. UAS, UAS Design and Subsystems*. 2016. P. 113. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae1153>.
16. Gritsenko V., Volkov O., Komar M., Voloshenyuk D. Integral adaptive autopilot for an unmanned aerial vehicle. *Aviation*. 2018. Vol. 22, N 4. P. 129–135. <https://doi.org/10.3846/aviation.2018.6413>.
17. Kleyko D., Osipov E., Rachkovskij D.A. Modification of holographic graph neuron using sparse distributed representations. *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 88. P. 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.07.404>.
18. Kleyko D., Rachkovskij D.A., Osipov E., Rahimi A. A survey on hyperdimensional computing aka vector symbolic architectures, part I: Models and data transformations. *ACM Computing Surveys*. 2022. <https://doi.org/10.1145/3538531>.
19. Kleyko D., Rachkovskij D.A., Osipov E., Rahimi A. A survey on hyperdimensional computing aka vector symbolic architectures, part II: Applications, cognitive models, and challenges. Accepted, *ACM Computing Surveys*. 2022. Available online: arXiv:2112.15424.
20. Rachkovskij D.A. Formation of similarity-reflecting binary vectors with random binary projections. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2015. Vol. 51, N 2. P. 313–323. <https://doi.org/10.1007/s10559-015-9723-z>.
21. Rachkovskij D.A. Real-valued vectors for fast distance and similarity estimation. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2016. Vol. 52, N 6. P. 967–988. <https://doi.org/10.1007/s10559-016-9899-x>.
22. Rachkovskij D.A. Binary vectors for fast distance and similarity estimation. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2017. Vol. 53, N 1. P. 138–156. <https://doi.org/10.1007/s10559-017-9914-x>.

O. Volkov, M. Komar, D. Rachkovskij, D. Volosheniuk

TECHNOLOGY OF AUTONOMOUS TAKE-OFF AND LANDING FOR THE MODERN NAVIGATION AND PILOTAGE COMPLEX OF THE UNMANNED AERIAL VEHICLE

Abstract. A technology of autonomous take-off and landing of an unmanned aerial vehicle is developed. The aim of the study is to increase the efficiency of the tasks that are faced by unmanned aerial vehicles. It is shown that the application of the proposed technology will make it possible to significantly increase the autonomy of take-off and landing from a wide range of initial conditions. It is demonstrated that the developed technology does not involve complex maneuvers for landing an unmanned aerial vehicle. An advantage of the technology is the ability to operate with common types of modern autopilots.

Keywords: autonomy, take-off, landing, unmanned aerial vehicle, ATOL, control.

Надійшла до редакції 04.05.2022