

Національна академія
наук України

Міністерство освіти
і науки України

**МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-НАВЧАЛЬНИЙ ЦЕНТР
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА СИСТЕМ**

ВОЛОШЕНЮК ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 629.7.051.83:629.7.017.2:681.5.011:681.518:517.977.5

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ КЕРУВАННЯ ПОСАДКОЮ
ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗА ВІРТУАЛЬНИМИ КРИВОЛІНІЙНИМИ
ТРАЄКТОРІЯМИ**

05.13.06 – інформаційні технології

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій та систем Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
доцент

Павлова Світлана Вадимівна,

Національний авіаційний університет, завідувач кафедри
авіоніки

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Зіатдінов Юрій Кашафович,

Київський фаховий коледж комп'ютерних технологій та
економіки, директор

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Пономаренко Сергій Олексійович,


Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент
кафедри систем керування літальними апаратами Інституту
аерокосмічних технологій

Захист відбудеться « 09 » вересня 2021 р. о 11.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.171.01 у Міжнародному науково-навчальному центрі інформаційних технологій та систем НАН та МОН України за адресою: 03187, м. Київ, проспект Академіка Глушкова, 40.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН та МОН України за адресою: 03187, м. Київ, проспект Академіка Глушкова, 40.

Автореферат розісланий: « 05 » серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.171.01



О.П. Лагода

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Значне зростання кількості та інтенсивності авіаційних перевезень по всьому світу спричиняє потребу максимально оптимізувати кожен етап польоту для підвищення економічної та екологічної ефективності, а разом із тим – для збереження та підвищення рівня безпеки польотів.

Одним із найбільш відповідальних і складних етапів польоту є посадка, яка характеризується зміною режиму польоту, психофізіологічними навантаженнями і коротким проміжком часу на виконання. Вагомі експлуатаційні прийоми на етапі посадки літальних апаратів (ЛА) з метою зниження авіаційного шуму та інших екологічних показників у цивільній авіації закріплено ключовою концепцією ІКАО (Міжнародна організація цивільної авіації), що стосується управління повітряним рухом з використанням супутникових систем зв'язку, навігації та спостереження при керуванні посадкою літальних апаратів.

Для передпосадкового маневрування ЛА в районі аеродрому при виконанні заходу на посадку виділяється обмежена ділянка повітряного простору у вертикальній та горизонтальній площинах, які звужуються при наближенні до злітно-посадкової смуги. Захід на посадку є основною областю ризику з високою імовірністю авіаційних подій. Не дивлячись на те, що сучасні пілотажно-навігаційні комплекси мають змогу вирішувати задачі автоматичного заходу на посадку з високою точністю, навіть незначний вихід параметрів польоту літака за експлуатаційні межі або відхилення від норм точності керування на цьому етапі можуть мати тяжкі наслідки. Крім цього, пілотажно-навігаційні комплекси не завжди дають змогу правильно відреагувати на зміни повітряної обстановки. У зв'язку з цим участь пілотів в керуванні ЛА у якості активного оператора є необхідною вимогою для надійного пілотування при виконанні інструментального заходу на посадку.

Різноманітні методи і технології керування літальним апаратом при заході на посадку та при виконанні посадкових маневрів були відображені в роботах таких авторів як: В.В. Павлов, С.Ю. Скрипниченко, В.М. Кунцевич, О.І. Запорожець, С.В. Павлова, А.А. Жевнин, В.М. Казак, А.А. Тунік, Р.К.А. Menon, Н.І. Kelley, Е.М. Cliff, М. Staroswiecki, М. Blanke, Н. Alwi тощо.

Наявні методи термінального керування на етапі посадки літального апарату в умовах невизначеності не дають змогу остаточно вирішити завдання забезпечення керування ЛА, яке б відповідало сучасним вимогам економічності, екологічності та безпеки, що підтверджується значною кількістю робіт, які пов'язані з темою дисертаційного дослідження. Основними недоліками наявних методів є:

- не враховується нелінійність поведінки ЛА під час заходу на посадку;
- обмежена працездатність у випадку, коли умови польоту

відрізняються від номінальних;

- не завжди витримуються термінальні обмеження;
- не враховуються фізичні та функціональні властивості літака;
- навігаційні системи, призначені для реалізації наявних методів, є технічно складними, потребують значної кількості матеріальних та інженерних ресурсів при втручанні у внутрішні системи літака, що в свою чергу призводить до труднощів під час нормативної сертифікації ЛА.

Тому *актуальною* є науково-прикладна задача вдосконалення методів і моделей та розроблення інформаційної технології керування літальним апаратом при заході на посадку, для підтримки прийняття рішення при побудові оптимальної посадкової траєкторії та підвищення безпеки польотів ЛА, а також економічних і екологічних показників використання авіаційної техніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась в рамках державних бюджетних тем Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН та МОН України: Ф.Ц. 185.09 «Створити теоретичні засади глобальних комп'ютерно-комунікаційних мереж інтелектуального управління жорсткими складними розподіленими динамічними процесами» (№ держреєстрації в УкрІНТЕІ 0112U002077), В.Ф. 185.10 «Розробити моделі та методи вирішення виражених конфліктних ситуацій» (№ держреєстрації в УкрІНТЕІ 0113U001011), Ф.Ц. 185.11 «Розробка методів і моделей інтелектуального управління динамічними процесами в розподілених комп'ютерно-комунікаційних середовищах» (№ держреєстрації в УкрІНТЕІ 0117U002110), В.П. 185.12 «Розроблення моделей та алгоритмів інтелектуального управління гібридними системами в умовах невизначеності» (№ держреєстрації в УкрІНТЕІ 0118U000092) та науково-дослідною роботою молодих вчених НАН України «Фундаментальні засади створення мережецентричної технології контролю передачі інформаційно-комунікаційних даних в мережі» (№ держреєстрації в УкрІНТЕІ 0115U005108).

Метою дисертаційної роботи є підвищення економічності, екологічності та безпеки виконання польотів на етапі посадки за допомогою створення нових методів, моделей та інформаційної технології керування посадкою літальних апаратів за віртуальними криволінійними траєкторіями.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішено такі **задачі**:

- аналіз існуючих методів, технологій і систем посадки літаків в умовах польотів за довільними маршрутами, а також формулювання математичного завдання розроблення нового методу керування посадкою ЛА;
- розроблення адаптивного методу керування посадкою ЛА за віртуальними криволінійними траєкторіями в умовах невизначеності та із урахуванням критеріїв оптимальності для зменшення дистанції

передпосадкового зниження;

- прогнозування стану та динаміки польоту літака в масштабі реального часу (із забезпеченням системної та функціонально-часової сумісності) шляхом розроблення синтезованої моделі динамічного руху та врахування розподіленого середовища управління;

- розроблення інформаційної технології керування посадкою літальних апаратів за віртуальними криволінійними траєкторіями, що забезпечує зменшення навантаження на бортову обчислювальну систему, підвищення безпеки польотів ЛА та поліпшення економічних і екологічних показників;

- розроблення системи та програмного забезпечення генерації віртуальних криволінійних траєкторій для посадки ЛА;

- верифікація розробленого методу шляхом проведення комп'ютерного та імітаційного моделювання.

Об'єкт дослідження: процес керування посадкою літального апарата в авіації.

Предмет дослідження: інформаційні технології, методи та моделі керування посадкою літального апарата за віртуальними криволінійними траєкторіями.

Методи дослідження: методи теорії інтелектуального керування, теорії термінального керування, теорії автоматичного керування, теорії нелінійної інваріантності, теорії ймовірності, статистичному і імітаційному моделюванні, теорії навігації, методах математичного аналізу, теорії оптимізації систем і процесів.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі отримано такі результати:

Вперше

- розроблено метод керування посадкою літальних апаратів, який відрізняється тим, що застосовує для розрахунку посадкової траєкторії повний математичний опис літального апарату, а також враховує невизначеності та відхилення у положенні ЛА при формуванні траєкторії посадки, що дає змогу забезпечити економічні та екологічні переваги над існуючими методами посадки, а також розвантажує повітряну зону очікування в районі посадки;

- розроблено метод генерації віртуальних криволінійних траєкторій, який, на відміну від існуючих, обчислює області керованого стану та зони невизначеності у положенні ЛА в зоні посадки, базуючись на інформації, отриманої від бортових датчиків та від наземних станцій управління повітряним рухом. Це дає змогу забезпечити зменшення дистанції передпосадкового зниження та покращити точність розрахункових значень для посадки ЛА;

- розроблено інформаційну технологію керування посадкою ЛА за віртуальними криволінійними траєкторіями, яка відрізняється від існуючих наявністю бази даних з набором характеристик ЛА, умов посадки та траєкторій

посадок у відповідному аеропорту, що забезпечує зменшення навантаження на бортову обчислювальну систему при виконанні розрахунку віртуальних криволінійних траєкторій посадки та забезпечує підвищення безпеки польотів ЛА та поліпшення економічних і екологічних показників.

Удосконалено

- сучасну концепцію організації повітряного руху, затверджену циркулярами ІКАО з питань управління повітряним рухом з використанням супутникових систем зв'язку, навігації та спостереження, при керуванні посадкою літальних апаратів за віртуальними криволінійними траєкторіями, як в номінальних умовах, так і при виникненні особливих ситуацій в польоті, що дає змогу зменшити рівень авіаційного шуму під час зниження літальних апаратів перед посадкою та рівень забруднення повітря викидами від авіаційних двигунів;

- методи термінального керування ЛА на етапі посадки в умовах невизначеності за допомогою виконання синтезу термінального керування на основі повної моделі руху ЛА та корекції реального руху ЛА для наближення його до еталонного модельного руху. Це дає змогу враховувати зміни аеродинамічних характеристик ЛА для виконання посадки, яка відповідає вимогам економічності, екологічності та безпеки.

Наукова новизна одержаних результатів захищена 4 патентами України та 3 авторськими свідоцтвами на комп'ютерні програми.

Практичне значення отриманих результатів. Створена інформаційна технологія керування ЛА при заході на посадку за гнучкими граничними траєкторіями та її реалізація відповідними алгоритмами та програмно-апаратними засобами забезпечить ефективне керування та маневрування ЛА із урахуванням розподіленого середовища управління, розходження згідно норм безпечного ешелонування, мінімізації можливостей виникнення конфліктних ситуацій тощо. Практичне значення запропонованої інформаційної технології полягає в тому, що вона підвищує економічність, ефективність та безпеку використання авіаційної техніки в умовах інтенсивного повітряного руху, а також розвантажує повітряну зону очікування в районі посадки.

Проведені імітаційні моделювання демонструють підвищення показників економічності та екологічності. Розроблена інформаційна технологія дає змогу скоротити витрату палива в середньому на 15%, а час виконання посадки зменшується щонайменше на 5 хвилин. Підвищення рівня безпеки польотів відбувається завдяки можливості виконання посадки в різних умовах польоту, а також при виникненні особливих ситуацій у польоті (наприклад, відмови двигунів, нестача пального, складні погодні умови тощо).

Результати наукових досліджень впроваджені в науково-дослідній роботі Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН та МОН України, в науковому та навчальному процесах факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікації Національного авіаційного

університету, в дослідно-конструкторському відділенні ДП «Антонов» та в Науково-виробничому центрі ВАТ «Меридіан» ім. С.П. Корольова.

Також основні результати дисертаційних досліджень можуть бути використані дослідно-конструкторськими організаціями та авіапідприємствами при розробці нових та удосконаленні існуючих інформаційно-керуючих систем. Можливі шляхи застосування результатів дослідження пов'язані зі створенням нових систем керування ЛА з впровадженням в організації, які займаються вирішенням подібних завдань, як для пілотованої, так і безпілотної авіації цивільного та/або військового призначення, а також, використання розроблених програмних засобів та моделей в установах авіаційної галузі, які займаються такими завданнями, як дослідно-конструкторська та науково-виробнича діяльність, проведення моделювань на сучасній технологічній базі при розробленні обладнання літальних апаратів. Отримані здобувачем результати доцільно застосовувати у навчальному процесі при викладанні курсів, пов'язаних із інформаційними технологіями та теорією автоматичного керування.

Крім того, результатами наукових досліджень, отримані в ході виконання дисертаційної роботи, успішно пройшли апробацію на Державному підприємстві «Антонов». В ході апробації були проведені спільні експериментальні моделювання та дослідження розробленої технології в дослідно-конструкторському відділенні Державного підприємства «Антонов».

Використання та впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними документами. Отримано свідоцтва про авторське право на комп'ютерні програми та патенти України.

Особистий внесок здобувача у працях зі співавторами.

Дисертаційна робота є результатом самостійних досліджень. Розроблення методів, моделей та інформаційної технології, проведення моделювання, обробки даних та аналіз одержаних результатів досліджень здійснено безпосередньо здобувачем. У [1, 14] – проаналізовано можливості тривимірного комп'ютерного моделювання та особливості роботи комп'ютерних мереж для проведення досліджень по віддаленому керуванню динамічними процесами; у [2, 13, 25] – описано мережецентричну систему для керування та передачі даних в ЛА для завдань заходу на посадку; у [3, 4, 15, 16] – представлено інваріантну мережецентричну систему для керування посадкою ЛА в умовах конфліктних ситуацій та руху за вільними траєкторіями; у [7, 19, 23] – представлено метод посадки ЛА за криволінійними траєкторіями в умовах обмежень; у [6, 20, 21] – надано результати моделювання застосування адаптивних систем керування посадкою ЛА за криволінійними граничними траєкторіями в умовах обмежень; у [5, 18] – описано керування посадкою ЛА в умовах інтенсивного повітряного руху за віртуальними криволінійними траєкторіями; у [8, 9] – представлено інтегрально-адаптивний автопілот для безпілотної авіації із інтелектуальними системами керування посадкою та процесом заходу на посадку в різних умовах; у

[10] – запропоновано комплекс моделювання для підготовки операторів безпілотних ЛА, який використовує алгоритми інформаційної технології керування заходом на посадку ЛА; у [11] – запропоновано інтелектуалізовану технологію автономного керування сучасними безпілотними ЛА із керуванням посадкою ЛА за віртуальними траєкторіями; у [17, 22, 24] – представлено вплив на безпеку польотів інформаційної технології посадки ЛА за криволінійними траєкторіями та оптимізацію траєкторії за відстанню та у часі; у [26] – створено комп'ютерну програму для генерації індивідуальних віртуальних криволінійних траєкторій посадки ЛА по вільним та оптимальним за часом та відстанню траєкторіям; у [27] – створено комп'ютерну програму для моделювання та експериментальних досліджень різних класів задач для літальних апаратів; у [28-30] – розроблено новий спосіб та пристрій посадки літаків за віртуальними криволінійними траєкторіями в межах граничних траєкторій; у [31] – розроблено новий спосіб автоматичного керування траєкторним рухом і тактичними маневрами безпілотного літального апарату в умовах обмежень та невизначеності.

Апробація наукових результатів. Основні результати роботи доповідались на всеукраїнських та міжнародних конференціях: Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» (Чернівці, 2015 р.), Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології в освіті, науці й техніці» (Черкаси, 2014 і 2016 роки), Сьома міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (Київ, 2014 р.), I Всеукраїнська науково-технічна конференція «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування України» (Харків, 2014), Науково-практична конференція «Інформаційно-вимірювальні технології та системи» (Київ, 2015 р.), XVI Міжнародна конференція «Проблеми інформатики та моделювання» (Одеса, 2016 р.), II Всеукраїнська наукова конференція «Актуальні проблеми розвитку освіти і науки в умовах глобалізації» (Дніпро, 2016 р.), VII Міжнародна наукова конференція «Сучасні інформаційні технології» (Одеса, 2017 р

Публікації за темою дисертації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 31 науковій роботі: 11 наукових статей у фахових та наукометричних виданнях, з них 2 статті у закордонних виданнях, які включено до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science; 18 тез доповідей на наукових конференціях; 4 патенти України; 3 авторських свідоцтва на комп'ютерні програми.

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається з анотації, переліку скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 170 сторінок, в тому числі 114 сторінок основного тексту, ілюстрованих 63 рисунками та 6 таблицями. Список використаних джерел містить 111 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** визначено актуальність теми дисертаційної роботи, мету і задачі дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Зазначено зв'язок теми дослідження з науковими програмами, планами, темами за місцем виконання дисертаційної роботи, а також показано особистий внесок здобувача у кожній опублікованій ним науковій праці. Перелічено повний список публікацій по матеріалам дисертації та наведено апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** проаналізовано особливості сучасних технологій посадки літаків, методи посадки літаків із застосуванням різноманітних технологій та інструментів, висвітлено особливості кожного з них. Представлено перспективні методи посадки та пропозиції до модернізації існуючих. Наведено технічні характеристики та схематичні плани сучасних систем посадки літаків для визначення їх особливостей та недоліків. Висвітлено огляд перспективної мікрохвильової посадки літаків та методу застосування технологій управління повітряним рухом за супутниковою навігацією для модернізації і покращення існуючих систем посадки, а також зменшення їхнього впливу на екологічні показники. Показано, що існуючі системи посадки літаків мають суттєві обмеження, а перспективні системи і методи посадки – суттєві функціональні складнощі, що майже унеможлиблює їх застосування. Обґрунтовано необхідність розроблення нового методу посадки літаків, що буде відповідати сучасним вимогам цивільної авіації.

Управління посадкою включає визначення черговості посадок ЛА у відведені часові рамки, присвоєння кожному ЛА номера ЗПС, розрахункового часу посадки, схеми заходу. Вибране рішення визначає траєкторію заходу на посадку. Побудова траєкторії польоту включає вибір профілю польоту для зниження з початкової висоти до моменту проходження над ЗПС. Посадка ЛА, як правило, складається з наступних етапів, які показано на рис. 1: зниження, планерування, вирівнювання, витримування, приземлення, пробігу. Посадці передують етап виходу до аеродрому і етап заходу на посадку.

Для зменшення кількості авіаційних подій ІКАО пропонує обов'язкове встановлення в аеропортах модернізованої системи інструментальної системи посадки (ILS) або мікрохвильової системи посадки (MLS). Інструментальний захід на посадку – серія заздалегідь передбачених маневрів, які виконуються за правилами польоту за приладами, що забезпечує правильність польоту ЛА від точки виходу з траси або зони очікування до візуального контакту із зоною приземлення або посадки, виконуваної автоматично. Мікрохвильова система посадки – радіомаякова система посадки сантиметрового діапазону, що забезпечує точне вимірювання координат місця положення ЛА в просторі і, на основі використання цих координат, виконання передпосадкового маневру, заходу на посадку, посадки до повного

приземлення по принципово будь-якій траєкторії.

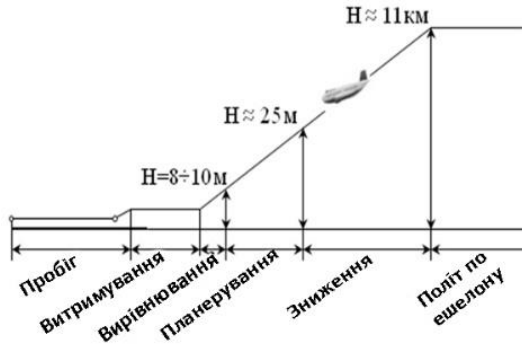


Рисунок 1 – Схема етапів сучасної посадки літаків

У **другому розділі** представлені загальні засади посадки ЛА за криволінійними траєкторіями; наведено математичний опис розрахунку посадкової траєкторії, принципи динамічного керування; розроблено метод керування посадкою ЛА, який відрізняється від існуючих тим, що застосовує для розрахунку посадкової траєкторії повний математичний опис ЛА, а також враховує невизначеності та відхилення у положенні ЛА та критерії оптимальності при формуванні траєкторії посадки; розвинуто методи термінального керування ЛА в умовах невизначеності на етапі посадки за допомогою виконання синтезу термінального керування на основі повної моделі руху ЛА та корекції реального руху ЛА для наближення його до еталонного модельного руху; показано розрахункові значення для посадки літальних апаратів за запропонованим методом та, для порівняння, за стандартними методами;.

Запропонований метод посадки літаків за віртуальними криволінійними траєкторіями передбачає гнучке безперервне зниження під час заходу на посадку. Алгоритм методу складається з 7 етапів (рис. 2):

1. Визначаються в масштабі реального часу поточні координати розташування літака, вираховуються зони невизначеності і відхилення положення, що обумовлене похибками оцінки поточної ситуації, неадекватністю математичних моделей, впливом навколишнього середовища, навігаційними похибками тощо.

2. Отримується точна інформація про точку приземлення (інформацію про місцевість, координати, злітно-посадкову смугу, навколишнє середовище) з диспетчерського центру управління повітряним рухом.

3. Отримується від систем літака точна інформація про стан польоту, його характеристики і параметри, погодні умови, фізичні та аеродинамічні характеристики конкретного літака.

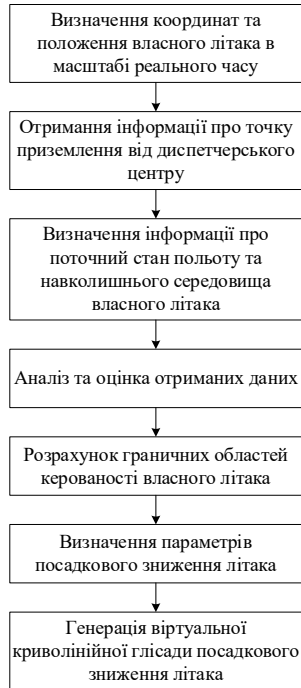


Рисунок 2 – Етапи роботи запропонованого методу посадки

4. Проводиться оцінка та аналіз всіх отриманих даних.

5. Розраховуються граничні області керованості літака, що характеризують можливості літака по зміні параметрів руху в один момент часу і дозволяють характеризувати нелінійність поведінки літака і процесу польоту взагалі.

6. Визначаються параметри посадкового зниження літака, а саме: координати точки початку зниження; швидкість літака, кут атаки та нахилу траєкторії, починаючи з точки початку зниження і до кінцевої точки з відповідними змінами по всій траєкторії зниження; координати кінцевої точки зниження; час необхідний для зниження літака; параметри роботи двигунів з урахуванням максимального зменшення їх тяги; параметри задіяння всіх аеродинамічних компонентів систем керування літаком (руль висоти, елерони, закрилки, інтерцептори тощо).

7. Генерується (розраховується і будується) віртуальна криволінійна траєкторія посадкового зниження літака на основі визначених параметрів за наступними формулами:

$$r_1 = \frac{V_1^2}{2 * g * (\cos(\theta_1) - n_{y1})} + \frac{V_2^2}{2 * g * (\cos(\theta_2) - n_{y1})},$$

$$r_2 = \frac{V_3^2}{2 * g * (n_{y2} - \cos(\theta_3))} + \frac{V_4^2}{2 * g * (n_{y2} - \cos(\theta_4))},$$

$$\Delta h_1 = -r_1 * (\cos(\theta_1) - \cos(\theta_2)),$$

$$\Delta h_2 = r_2 * (\cos(\theta_3) - \cos(\theta_4)),$$

$$\Delta H = -(\Delta h_1 + \Delta h_2),$$

де r_1, r_2 – радіуси першої та другої половини криволінійної траєкторії;
 V_1, V_3 – швидкості ЛА на початку першої та другої половини траєкторії;
 V_2, V_4 – швидкості ЛА наприкінці першої та другої половини траєкторії;

g – прискорення вільного падіння;

θ_1, θ_3 – кут нахилу траєкторії на початку першої та другої половини траєкторії;

θ_2, θ_4 – кут нахилу траєкторії наприкінці першої та другої половини траєкторії;

n_{y1}, n_{y2} – перевантаження на першій та другій половині траєкторії.

$\Delta h_1, \Delta h_2$ – перепад висоти зниження на першій та другій половині траєкторії;

ΔH – загальний перепад висоти зниження всієї траєкторії.

При генерації віртуальної криволінійної траєкторії посадкового зниження літака застосовуються додаткові критерії оптимальності, які направлені на: забезпечення побудови граничної траєкторії посадкового зниження, що необхідно для максимального зменшення часу і відстані необхідних для посадки; забезпечення найменшої тяги двигунів на етапі посадкового зниження. Схематичний приклад віртуальної криволінійної траєкторії посадкового зниження показано на рис. 3., де Lc – точка поєднання двох частин траєкторії; $Q_i (H_i, V_i, L_i, \theta_i)$ – область можливих траєкторій руху літака на першій частині посадкового зниження; $Q_k (H_k, V_k, L_k, \theta_k)$ – область можливих траєкторій руху літака на другій частині посадкового зниження.

Розроблений метод керування посадкою ЛА має дві стратегії виконання. Перша стратегія – за умови жорстко закріпленого перевантаження при виконанні зниження, але з різними швидкостями на початку і в кінці зниження. Друга – за умов жорстко закріплених швидкостей на початку і в кінці зниження, але з різним перенавантаженням в допустимих межах.

Третій розділ містить опис розроблення інформаційної технології керування посадкою ЛА, системи генерації віртуальних криволінійних траєкторій посадкового зниження літаків у вигляді уніфікованого обладнання, програмного модуля для моделювання розробленої системи та інформаційної технології та результати проведених моделювань.

В основі розробленої системи (рис. 4) лежить задача практичної реалізації методу керування посадкою ЛА за віртуальними криволінійними траєкторіями у вигляді окремого уніфікованого обладнання, шляхом використання даних від бортових систем літака та даних, які передаються з диспетчерських центрів на землі, що дасть змогу забезпечити високу якість виконання методу з мінімальними затратами.

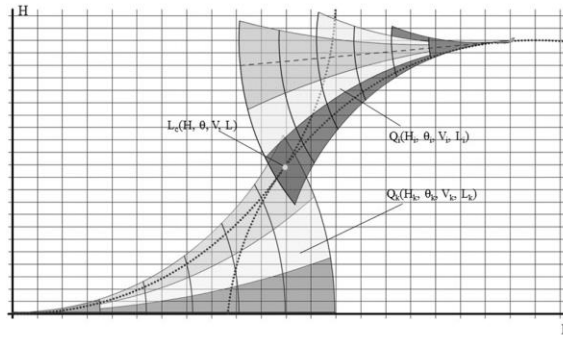


Рисунок 3 – Схематичний приклад віртуальної криволінійної траєкторії

Система працює циклічно, неперервно отримуючи дані від внутрішніх систем власного літака та наземних станій управління, передаючи результуючі дані до систем керування власного ЛА. Дані постійно приймаються та обробляються у відповідних модулях, частина з них зберігається для використання в наступних інтервалах часу.

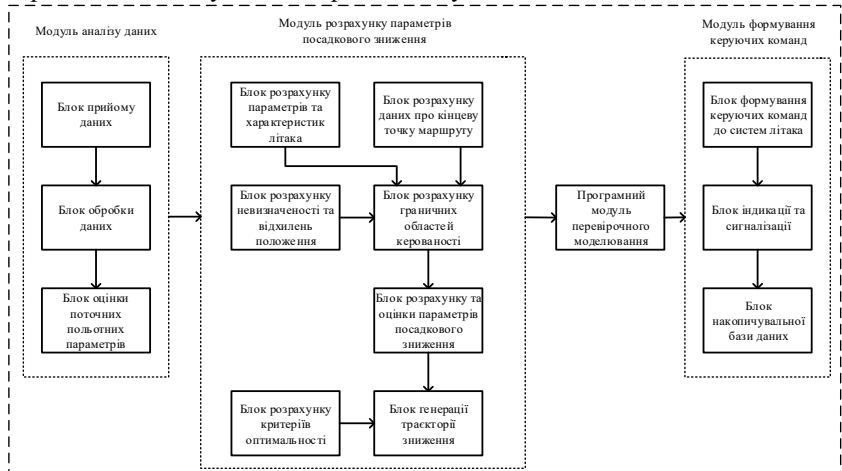


Рисунок 4 – Структурна блок-схема системи генерації віртуальних криволінійних траєкторій посадкового зниження літаків

Програмні модулі для комплексу моделювання, що реалізують систему генерації віртуальних криволінійних траєкторій посадкового зниження, дозволяють виконувати симуляцію роботи розробленої в дисертаційній роботі інформаційної технології. Залежність довжини траєкторії посадки від кількості ЛА в заданій зоні зображена на рис. 5.

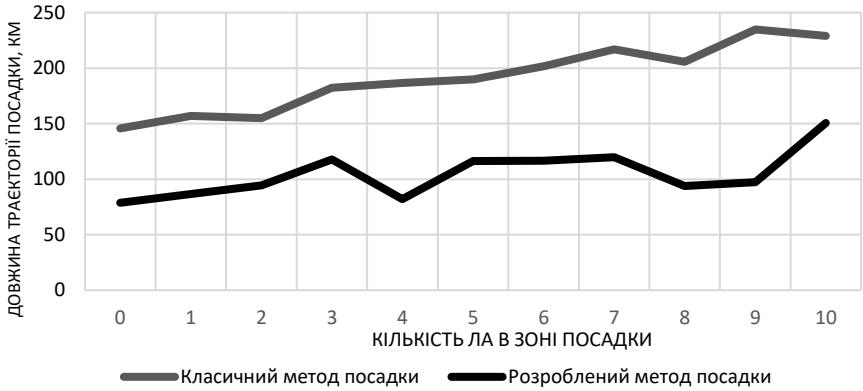


Рисунок 5 – Залежність довжини траєкторії посадки від кількості ЛА

У **четвертому розділі** наведено результати моделювань розробленої інформаційної технології керування посадкою ЛА. Проведені моделювання підтверджують працездатність та ефективність розробленої інформаційної технології керування посадкою ЛА. В середовищі Matlab було побудовано модель посадки ЛА за розробленою інформаційною системою, а для порівняння було використано класичний метод посадки. Результати моделювань в середовищі Matlab було підтверджено проведеними дослідженнями на реальному комплексі моделювання в ДП «Антонов».



Рисунок 6 – Час виконання посадки для класичного та розробленого методів

В якості основних показників ефективності та економічності керування посадкою ЛА прийнято: повний час виконання посадки та витрати

палива. Отримані при проведених моделюваннях результати показують, що розроблена інформаційна технологія керування посадки літаків суттєво краща в показниках часу повного виконання посадки та економії використання палива. Порівняння класичного методу посадки та розробленої інформаційної технології в аспекті часу виконання посадки представлено на рис. 6., а в аспекті витрат палива за виконання посадки зображено на рис. 7.



Рисунок 7 – Кількість палива після приземлення для класичного та розробленого методів

Проведені імітаційні моделювання демонструють підвищення показників економічності та екологічності. Розроблена інформаційна технологія дає змогу скоротити витрату палива в середньому на 15%, а час виконання посадки зменшується щонайменше на 5 хвилин. Підвищення рівня безпеки польотів відбувається завдяки можливості виконання посадки в різних умовах польоту, а також при виникненні особливих ситуацій у польоті.

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

Сукупність отриманих у дисертації результатів забезпечує розв'язання актуального науково-прикладного завдання вдосконалення методів і моделей та розроблення інформаційної технології керування літальними апаратами (ЛА) при заході на посадку за віртуальними криволінійними траєкторіями, для підтримки прийняття рішення при побудові оптимальної посадкової траєкторії та підвищення рівня економічності і екологічних показників використання авіаційної техніки, а також безпеки польотів. Розроблена інформаційна технологія забезпечує ефективне керування та маневрування ЛА із урахуванням розподіленого середовища управління, розходження згідно норм ешелонування та мінімізації

можливостей виникнення конфліктних ситуацій.

В ході виконання дисертаційної роботи:

1. Здійснено аналіз існуючих технологій та систем посадки літаків в умовах польотів за довільними маршрутами та показано особливості кожної із них; представлено перспективні методи керування посадкою; визначено особливості та недоліки кожного методу та технології.

2. Наведено критичний аналіз мікрохвильової посадки літаків та методів управління повітряним рухом за супутниковою навігацією для модернізації та покращення існуючих систем посадки; показано що існуючі системи посадки ЛА мають суттєві обмеження, а перспективні системи і методи посадки – суттєві функціональні складнощі, що майже унеможливило їх застосування.

3. Вперше розроблено інформаційну технологію керування посадкою ЛА за віртуальними криволінійними траєкторіями, яка відрізняється від існуючих наявністю бази даних з набором характеристик ЛА, умов посадки та траєкторій посадок у відповідному аеропорту, що забезпечує зменшення навантаження на бортові системи при виконанні розрахунків та забезпечує підвищення рівня економічних і екологічних показників та безпеки польотів.

4. Вперше розроблено метод керування посадкою літальних апаратів, який відрізняється від існуючих тим, що застосовує для розрахунку посадкової траєкторії повний математичний опис літального апарату, а також враховує невизначеності та відхилення у положенні ЛА та критерії оптимальності при формуванні траєкторії посадки.

5. Наведено математичний опис розрахунку посадкової траєкторії, принципи динамічного керування, показано розрахункові значення для посадки літальних апаратів за запропонованим методом та, для порівняння, за стандартними методами.

6. Набули подальшого розвитку методи термінального керування літальним апаратом на етапі посадки в умовах невизначеності за допомогою виконання синтезу термінального керування на основі повної моделі руху ЛА та корекції реального руху ЛА для наближення його до еталонного модельного руху. Це дає змогу враховувати зміни аеродинамічних характеристик ЛА для виконання посадки, яка відповідає вимогам економічності, екологічності та безпеки.

7. Вперше розроблено метод генерації віртуальних криволінійних траєкторій, що обчислює області керованого стану та зони невизначеності у положенні літальних апаратів в зоні посадки, базуючись на інформації, отриманої не тільки від датчиків, розташованих на борту ЛА, але й від наземних станцій управління повітряним рухом.

8. Удосконалено сучасну концепцію організації повітряного руху затверджену циркулярами ІКАО при керуванні посадкою літальних апаратів за віртуальними криволінійними траєкторіями, як в номінальних умовах, так і

при виникненні особливих ситуацій в польоті, що дає змогу зменшити рівень авіаційного шуму під час зниження літальних апаратів перед посадкою та рівень забруднення повітря викидами від авіаційних двигунів.

9. Розроблено систему генерації віртуальних криволінійних траєкторій посадкового зниження літаків, яка відрізняється від існуючих тим, що містить високопродуктивний блок програмного перевірконого моделювання; наведено структурну блок-схему та описано принцип роботи кожного з елементів системи та взаємозв'язки між ними.

10. Створено програмне забезпечення для проведення моделювання розробленої системи та інформаційної технології у вигляді програмного модуля; виконано низку моделювань для аналізу літальних апаратів в зоні виконання посадки; досліджено взаємодії між ЛА, довжини траєкторії при виконанні посадки, використання палива та інші параметри.

11. Проведено верифікацію розробленої інформаційної технології шляхом імітаційного моделювання; показано підвищення показників ефективності та економічності використання авіаційної техніки в умовах інтенсивного повітряного руху. Розроблена інформаційна технологія дає змогу скоротити витрату палива в середньому на 15%, а час виконання посадки зменшується щонайменше на 5 хвилин. Підвищення рівня безпеки польотів відбувається завдяки можливості виконання посадки в різних умовах польоту, а також при виникненні особливих ситуації у польоті (наприклад, відмови двигунів, нестача пального, складні погодні умови тощо). Здійснено аналіз існуючих технологій та систем посадки літаків в умовах польотів за довільними маршрутами та показано особливості кожної із них; представлено перспективні методи керування посадкою; визначено особливості та недоліки кожного методу та технології.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових виданнях:

1. Pavlov V.V., Volkov O.Ye., Voloshenyuk D.O. Computer simulation of modern aircrafts by using network technologies of remote control: scientific article. Kyiv: Proceedings of the National Aviation University: science journal: 2013. №4. P. 18-22. (*Google Scholar*)
2. Павлов В.В., Волков О.Є., Волошенюк Д.О. Сетевая система управления и контроля передачи информационных данных в моделях удаленного управления воздушными кораблями: стаття. Київ: Управляющие системы и машины: науковий журнал: 2014. №5. С. 13-23. (*Google Scholar*)
3. Павлов В.В., Волков О.Є., Волошенюк Д.О. Концепция сетецентрического управления посадкой самолетов по свободным траекториям с технологией решения конфликтных ситуаций: стаття. Київ: Кибернетика и вычислительная техника: науковий журнал: 2014. 178. С. 36-51. (*Google Scholar*)

4. Павлов В., Волков О., Волошенко Д. Инвариантная сетцентрическая система управления конфликтными ситуациями воздушных кораблей на этапе захода на посадку: стаття. Київ: Кибернетика и вычислительная техника: науковий журнал: 2015. №180. С. 45-65. (*Google Scholar*)

5. Павлова С.В., Волошенко Д.О. Керування посадкою літаків в умовах підвищення інтенсивності повітряного руху: стаття. Київ: Управляючі системи та машини: науковий журнал: 2017. №5. С. 62-74. (*Google Scholar*)

6. Voloshenyuk D.O. Airplane landing by curvilinear glide paths in limits of border trajectories modelling method: scientific article. Kyiv: Control Systems and Machines: scientific journal: 2017. №6. P. 65-70. (*Google Scholar*)

7. Pavlova S.V., Voloshenyuk D.O. Method of the airplane landing by curvilinear glide paths in limits of border trajectories: scientific article. Kyiv: PROCEEDINGS OF THE NATIONAL AVIATION UNIVERSITY: scien. j.: 2017. 4. P. 36-43. (*Google Scholar*)

8. Grycenko V.I., Komar M.M., Volkov O.Ye., Voloshenyuk D.O. Integral Adaptive Autopilot for an Unmanned Aerial Vehicle: scientific article. Vilnius, Lithuania: AVIATION: Scientific journal: 2018. Vol. № 22. P. 129-195. (*Web of Science, SCOPUS, Google Scholar*)

9. Гриценко В.І., Волков О.Є., Комар М.М., Шепетуа Ю.М., Волошенко Д.О. Інтегрально-адаптивний автопілот як засіб інтелектуалізації сучасного безпілотного літального апарату: стаття. Київ: Кибернетика и вычислительная техника: науковий журнал: 2019. Вип. 195. С. 5-22. (*Google Scholar*)

10. Volkov O., Komar M., Synytsya K., Voloshenyuk D. The UAV Simulation Complex For Operator Training: scientific article. Porto, Portugal: Multi conference on computer science and information systems: 13th Multi Conference (MCCSIS 2019): 2019. P. 313-317. (*SCOPUS, Google Scholar*)

11. Гриценко В.І., Волков О.Є., Шепетуа Ю.М., Комар М.М., Волошенко Д.О. Інтелектуалізована технологія автономного керування сучасними безпілотними авіаційними системами: стаття. Київ: Озброєння та військова техніка: науково-технічний журнал: 2020. вип. 4. (28). С. 75-82. (*Google Scholar*)

Тези матеріалів конференцій:

12. Волков О.Є., Волошенко Д.О. Ергатична мережецентрична система керування посадкою літаків: тези. *ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ОСВІТІ, НАУЦІ Й ТЕХНІЦІ*: Міжнародна науково-практична конференція, 24-26 квітня 2014 р.: тези доп. – Черкаси, 2014. – С. 42-43. (*заочна участь*).

13. Волков О., Волошенко Д. Эргатическая сетцентрическая система управления посадкой воздушных кораблей по свободным траекториям в конфликтных ситуациях: тези. *ІРТК-2014: 7 міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси»*, 19-20 травня 2014 р.: тези доп. – Київ, 2014. – С. 40-42. (*секційна доповідь*).

14. Волков О.Є., Волошенко Д.О. Застосування комп'ютерного

модельовання в розробці авіаційних систем посадки та попередження зіткнення повітряних кораблів: тези. *ІМТ-2014: всеукраїнська науково-практична конференція «Інформаційні та Моделюючі Технології»*, 29-31 травня 2014 р.: тези доп. – Черкаси, 2014. – С. 53. (*онлайн доповідь*).

15. Волошенюк Д.О. Сетецентрическая система управления посадкой самолетов по свободным траекториям: тези. *Актуальные вопросы образования и науки: Международная заочная научно-практическая конференция*, 30.09.2014 г.: тези доп. – Россия, Тамбов, 2014. – С. 21-23. (*заочна участь*).

16. Павлов В.В., Волошенюк Д.О. Адаптивная сетецентрическая система управления посадкой самолетов по свободным траекториям: тези. *АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИКИ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ УКРАЇНИ: I Всеукраїнська науково-технічна конференція*, 11-12 грудня 2014 р.: тези доп. – Харків, 2014. – С. 120-121. (*секційна доповідь*).

17. Павлов В.В., Волков О.С., Комар М.М., Волошенюк Д.О. Новые подходы к обеспечению безопасности полетов путем интеллектуализации систем автоматического управления: тези. *Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки – 2015: IV міжнародна науково-практична конференція*, 05.2015 р.: тези доп. – Чернівці, 2015. – С. 55-57. (*заочна участь*).

18. Волошенюк Д.О. Адаптивна технологія посадки літаків за віртуальними криволінійними траекторіями: тези. *Проблеми навігації і управління рухом: Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених і студентів*, 11.2015 р.: тези доп. – К., 2015. – С. 10. (*секційна доповідь*).

19. Волошенюк Д.О. Технологія посадки літаків за криволінійними траекторіями: тези. *Інформаційно-вимірювальні технології та системи: Науково-практична конференція: тези доп. – К., 2015. – С. 11. (заочна участь)*.

20. Волошенюк Д.О. Применение адаптивных систем для управления посадкой самолета по оптимальным и криволинейным траекториям: тези. *АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИКИ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: II Всеукраїнська науково-технічна конференція*, 10-11 грудня 2015 р.: тези доп. – Х., 2015. – С. 133-134. (*пленарна доповідь*).

21. Волошенюк Д.О. Технологія віртуальної посадки літаків за криволінійними граничними траекторіями: тези. *Інформаційні технології в освіті, науці й техніці: III Міжнародна науково-практична конференція*, 12-14 травня 2016 р.: тези доп. – Черкаси, 2016. – С. 57-58. (*заочна участь*).

22. Волошенюк Д.О. Современная технологий посадки воздушных суден как метод повышения эффективности полетов в гражданской авиации: тези. *Проблеми інформатики и моделирования: XVI Международная конференция*, 12-16 сентября 2016 р.: тези доп. – Одесса, 2016. – С. 19. (*секційна доповідь*).

23. Павлова С.В., Волошенюк Д.О. Метод управления посадкой самолета по криволинейным предельным траекториям: тези. *Актуальні проблеми розвитку освіти і науки в умовах глобалізації: II Всеукраїнська наукова*

конференція, жовтень 2016: тези. – Дніпро, 2016. – С. 289-292. (*заочна участь*).

24. Павлова С.В., Волошенюк Д.О. Технологія посадки самолетов по криволинейним траекториям оптимальним по времени и расстоянию: тези. *Сучасні інформаційні технології 2017: VII Міжнародна наукова конференція, 22-24 травня 2017 р.*: тези. – Одеса, 2017. – С. 67-68. (*секційна доповідь*).

Патенти України та свідоцтва про реєстрацію авторського права:

25. Павлов В.В., Волков О.Є., Волошенюк Д.О. Комп'ютерна програма «Моделювання польоту літака на базі ергатичної мережецентричної системи керування»: свідоцтво про реєстрацію авторського права №56158. Україна. Опубл. 20.08.2014.

26. Павлов В.В., Волошенюк Д.О. Комп'ютерна програма генерації індивідуальних віртуальних криволінійних глісад посадки літаків по вільним та оптимальним за часом та відстанню траекторіям: свідоцтво про реєстрацію авторського права №61657. Україна. Опубл. 14.09.2015.

27. Богачук Ю.П., Господарчук О.Ю., Комар М.М., Мельников С.В., Волков О.Є., Волошенюк Д.О. Комп'ютерна програма «Комплекс аеродинамічних моделей безпілотних літальних апаратів для моделювання та експериментальних досліджень різних класів задач»: свідоцтво про реєстрацію авторського права №74556. Україна. Опубл. 07.11.2017.

28. Павлов В.В., Павлова С.В., Волошенюк Д.О. Спосіб та пристрій посадки літаків за віртуальними криволінійними глісадами в межах граничних траекторій: патент України на винахід № 116055. Україна, МПК G01C 21/00; G05B 13/04; G05B 15/00; G05B 17/00; G05D 1/00; G06N 7/00; G08G 5/00. Заявл. 07.07.2016; Опубл. 25.01.2018, Бюл. №2.

29. Павлов В.В., Павлова С.В., Волошенюк Д.О. Спосіб посадки літаків за віртуальними криволінійними глісадами в межах граничних траекторій: патент на корисну модель №112769. Україна, МПК G01C 21/00; G05B 13/04; G05B 15/00; G05B 17/00; G05D 1/00; G06N 7/00; G08G 5/00. №201607423; Заявл. 07.07.2016; Опубл. 26.12.2016, Бюл. №24.

30. Павлов В.В., Павлова С.В., Волошенюк Д.О. Пристрій посадки літаків за віртуальними криволінійними глісадами в межах граничних траекторій: патент на корисну модель №112768. Україна, МПК G01C 21/00; G05B 13/04; G05B 15/00; G05B 17/00; G05D 1/00; G08G 5/00. Заявл. 07.07.2016; Опубл. 26.12.2016, Бюл. №24.

31. Гриценко В.І., Комар М.М., Коршунов М.В., Волков О.Є., Богачук Ю.П., Шпетуха Ю.М., Мельников С.В., Господарчук О.Ю., Волошенюк Д.О. Спосіб автоматичного керування траекторним рухом і тактичними маневрами безпілотного літального апарату в умовах обмежень та невизначеності: патент на корисну модель № 123689. Україна, МПК G05B 13/00; G05B 17/00; G05D 1/00; G06N 7/00; G08G 5/00. №201707535; Заявл. 17.07.2017 р.; Опубл. 12.03.2018, Бюл. №5.

АНОТАЦІЯ

Волошенюк Д.О. Інформаційна технологія керування посадкою літальних апаратів за віртуальними криволінійними траєкторіями. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології – Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України, Київ, 2021.

В дисертаційній роботі запропоновано інформаційну технологію керування посадкою літальних апаратів за віртуальними криволінійними траєкторіями, яка заснована на теоріях термінального та інтелектуального керування, теорії нелінійної інваріантності. Основним призначенням є підвищення економічності, екологічності та безпеки виконання польотів на етапі посадки. Розроблено методи, алгоритми та систему, що виконують прогнозування стану та динаміки польоту літального апарату, а також враховують розподілене середовище управління, розходження згідно норм безпечного ешелонування, мінімізацію виникнення конфліктних ситуацій.

В дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-прикладну задачу вдосконалення методів і моделей та розроблення інформаційної технології керування літальним апаратом при заході на посадку, для підтримки прийняття рішення при побудові оптимальної посадкової траєкторії та підвищення безпеки польотів літальних апаратів, а також економічних і екологічних показників використання авіаційної техніки.

Ключові слова: інформаційна технологія, літальний апарат, метод посадки, мікрохвильові системи, криволінійні траєкторії, повітряний рух, авіаційна безпека.

ABSTRACT

Voloshenyuk D.O. Information technology for controlling aircraft landings along virtual curvilinear trajectories. – Graduate qualification work printed as manuscript.

Thesis for a Candidate of Sciences degree (Technical) [Ph. D.] in specialty 05.13.06 – Information Technologies – International Research and Training Centre for Information Technologies and Systems of the National Ukrainian Academy of Systems and the Ministry of Science and Education of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to developing an information technology for controlling aircraft landings along virtual curvilinear trajectories. Technology is based on the theories of terminal and intelligent control, the theory of nonlinear invariance. The main purpose is to increase the efficiency, environmental friendliness and safety of flights at the landing stage. Methods, algorithms and a system have been developed. They allow prediction of the state and dynamics of the

flight of the aircraft, as well as taking into account the distributed control environment, the discrepancy in accordance with the norms of safe separation, minimization of the occurrence of conflict situations.

The thesis solves an important scientific and applied problem of improving methods, models and development of information technology for controlling an aircraft during an approach is solved. The result allows supporting decision-making in constructing an optimal landing trajectory and improving the safety of aircraft flights, as well as economic and environmental indicators of the use of aircraft.

Keywords: information technology, aircraft, landing method, microwave systems, curvilinear trajectories, air traffic, aviation security.

АННОТАЦИЯ

Волошенюк Д.А. Информационная технология управления посадкой летательных аппаратов по виртуальным криволинейным траекториям. – Квалификационная научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.13.06 – Информационные технологии – Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, Киев, 2021.

В диссертационной работе предложена информационная технология управления посадкой летательных аппаратов по виртуальным криволинейным траекториям, которая основана на теориях терминального и интеллектуального управления, теории нелинейной инвариантности. Основным назначением является повышение экономичности, экологичности и безопасности выполнения полетов на этапе посадки. Разработаны методы, алгоритмы и система, выполняющие прогнозирование состояния и динамики полета летательного аппарата, а также учитывающие распределенную среду управления, расхождение соответственно нормам безопасного эшелонирования, минимизацию возникновения конфликтных ситуаций.

В диссертационной работе решена важная научно-прикладная задача совершенствования методов, моделей и разработки информационной технологии управления летательным аппаратом при заходе на посадку, для поддержки принятия решения при построении оптимальной посадочной траектории и повышения безопасности полетов летательных аппаратов, а также экономических и экологических показателей использования авиационной техники.

Ключевые слова: информационная технология, летательный аппарат, метод посадки, микроволновые системы, криволинейные траектории, воздушное движение, авиационная безопасность.