

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КУЗЬМЕНКО НАТАЛІЯ СЕРГІЇВНА



На правах рукопису
УДК 004.032.2:629.7.014–519.05 (043.3)

**БАГАТОПАРАМЕТРИЧНЕ ВІДНОВЛЕННЯ ДАНИХ У БЕЗПЛОТНІЙ
АВІАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ З БАГАТОАЛЬТЕРНАТИВНОЮ
КЛАСИФІКАЦІЄЮ ПОЛЬОТНИХ СИТУАЦІЙ**

Спеціальність 05.22.13 – Навігація та управління рухом

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2017

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор
ХАРЧЕНКО Володимир Петрович,
Національний авіаційний університет,
проректор з наукової роботи НАУ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ПИСАРЧУК Олексій Олександрович,
начальник кафедри охорони державної
таємниці та захисту інформації
Житомирського військового інституту
ім. С.П. Корольова

кандидат технічних наук, доцент
КОЛОТУША Володимир Петрович,
начальник відділу підготовки персоналу
ОрПР Навчально-сертифікаційного центру
Державного підприємства Обслуговування
повітряного руху України

Захист відбудеться «23» лютого 2017 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.03 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03680, м. Київ-680, просп. Космонавта Комарова, 1, НАУ.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці НАУ за адресою: 03680, м. Київ-680, просп. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розіслано «18» січня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д.т.н., проф., с.н.с.



С. В. Павлова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток безпілотних авіаційних систем (БАС) відобразився новою сторінкою в історії авіації та космонавтики. Проте, подальший розвиток та використання БАС обмежується відсутністю єдиного Європейського регулювання, що охоплює функціонування безпілотного літального апарату (БПЛА) як цивільного так і військового застосування. Відповідно до останніх міжнародних досліджень, одними з пріоритетних питань розвитку БАС є відновлення польотної інформації у випадку дії непередбачуваних факторів та автоматичний моніторинг польотних ситуацій БПЛА.

Пропуски в результатах вимірювань параметрів БПЛА є типовою проблемою функціонування БАС, що ставлять під загрозу вдале виконання польотного завдання. Основні причини появи пропусків даних можуть бути результатом дії завад у каналі інформаційного обміну БАС або особливості функціонування датчиків наземних та бортових систем. Дії цих факторів спонукають до потреби постійного контролю параметрів у БАС та створюють необхідність у визначенні класу польотної ситуації для своєчасного попередження незапланованих відхилень за дозволені межі, що можуть призвести до невиконання польотного завдання.

Для класифікації наявної польотної ситуації найбільш ефективним є застосування ймовірнісних методів теорії розпізнавання, зокрема використання критерію Байеса.

Вагомий внесок у розвиток теорії відновлення пропусків у послідовностях даних внесли вчені: Д. Фрідман, Р. Літл, Б. Ефрон, Е.Злоба, С. Лучкова та інші. Однак, запропоновані методи не враховують специфіку безпілотної авіації та, у окремих випадках, є складними до застосування на борту БПЛА. Відповідно до аналізу наявних методів відновлення даних, найбільш доцільними для застосування у БАС є використання регресійного підходу з використанням сплайн-функцій за багатьма параметрами. Окрім того, важливим є оцінювання похибок відновлених даних.

Питання багатоальтернативної класифікації були висвітлені у працях: С. Л. Подвального, Д. А. Кошасва, С. В. Андраханова, А. Л. Горелика, Я. Е. Львовича. Зокрема, розпізнаванню польотних ситуацій присвячені праці вчених: В.П. Харченка, Г.Г. Косенка, І.В. Остроумова та інших.

Отже, з наведеного вище, постає актуальна, відповідно до нормативних документів, науково-практична задача розробки нового методу відновлення втрачених польотних даних у БАС за багатьма параметрами, що враховуватиме похибки вимірювального обладнання та забезпечить ефективне відновлення пропусків даних у БАС. Окрім того, для вирішення питань безпеки функціонування БАС, виникає необхідність у адаптації

існуючого підходу до визначення польотних ситуацій БПЛА. Розв'язання цього питання тісно пов'язане з розробкою метрики класів польотних ситуацій та удосконаленням методу багатоальтернативної класифікації для визначення наявної польотної ситуації з використанням відновлених даних у місцях пропусків чи аномальних значень. Керування БАС пов'язане з обробкою складних інформаційних потоків даних. Їх втрата або спотворення, навіть на незначний час, зменшує рівень ситуаційної обізнаності оператора та створює ризик невиконання польотного завдання. Застосування багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій підвищує ситуаційну обізнаність оператора БАС та дозволяє йому вчасно прийняти рішення щодо подальшого виконання польотного завдання, а отже, сприятиме підвищенню рівня безпеки авіації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Робота виконана в рамках фундаментальних науково-дослідних робіт: шифр 493ДБ–08 – тема «Теоретичні засади багатоальтернативного ситуаційного моделювання та оцінки ризиків в соціотехнічних системах» (номер держреєстрації 0108U004004), шифр 729ДБ–11 – тема «Розроблення автоматизованої системи мінімізації впливу людського фактору з англomовною складовою на безпеку аеронавігаційного обслуговування» (номер держреєстрації 0111U002325), шифр 871ДБ–13 – тема «Розробка методів та алгоритмів інтеграції датчиків навігаційної системи для управління безпілотним повітряним судном» (номер держреєстрації 0113U000090).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка методів багатопараметричного відновлення втрачених та коригування аномальних значень польотних даних у БАС, а також багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій БПЛА.

Для досягнення мети роботи поставлено та розв'язано такі ієрархічно взаємопов'язані завдання:

- аналіз методів відновлення польотної інформації, а також загальних принципів класифікації польотних ситуацій;
- розроблення методу багатопараметричного відновлення даних у безпілотній авіаційній системі;
- удосконалення методу багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій безпілотного літального апарату з урахуванням відновлених даних;
- верифікація розроблених методів шляхом комп'ютерного моделювання та експериментальних випробувань.

Об'єктом дослідження є процес багатопараметричного відновлення відсутніх значень параметрів польоту безпілотного літального апарату.

Предметом дослідження є методи виявлення аномальних значень та відновлення втрачених даних у результатах вимірювань параметрів у безпілотній авіаційній системі.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використані методи математичного аналізу, теорії ймовірностей, комп'ютерного моделювання та емпіричних досліджень шляхом експериментальних випробувань.

Наукова новизна одержаних результатів.

Розроблено новий метод багатопараметричного відновлення втрачених польотних даних у безпілотній авіаційній системі, відмінність якого полягає у використанні наявних параметрів польоту та їх попередніх вимірів для заповнення пропусків і коригування аномальних значень даних з урахуванням похибок вимірювального обладнання.

Отримано подальший розвиток багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій для застосування у БАС, що дозволить оцінити рівень результативного виконання польотного завдання відповідно до поставлених завдань.

Модифіковано метод багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій в частині багатопараметричності, на основі відхилень від запланованих значень з урахуванням відновлених даних і поширено для застосування у БАС, що дозволить розпізнати наявну польотну ситуацію БПЛА за фіксованою польотною інформацією БПЛА.

Вперше отримано математичну залежність для оцінювання граничної величини похибки відновлення даних за багатопараметричним методом, що дає можливість оцінити точність відновлення даних.

Практичне значення одержаних результатів. Основні результати роботи становлять науково-методологічну основу для створення новітніх систем відновлення та обробки польотної інформації БАС, програмного забезпечення для аналізу результатів виконання поставленого польотного завдання та функціонування БАС в умовах переходу до нових концепцій виконання польотів БПЛА, що дозволяє розв'язувати такі завдання:

- за рахунок використання у процесі відновлення багатьох наявних параметрів БПЛА, отримувати більш точні значення даних у місцях пропусків у порівнянні з іншими статистичними методами імпутації даних за окремим параметром;

- комплексне використання критеріїв розпізнавання аномальних значень параметрів у БАС, дозволяє більш достовірно визначати часові відліки їх появи задля подальшого коригування за розробленим методом;

- за величиною відхилення від запланованих значень параметрів БПЛА оцінювати клас наявної польотної ситуації для постійного моніторингу дотримання виконання польотного завдання;

- розраховувати ймовірності правильного розпізнавання класу польотної ситуації для подальшого оцінювання стану безпеки польотів.

Розроблено програмно-алгоритмічне забезпечення для дослідження впливу відновлених даних на результати багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій.

Створено програмне забезпечення для декодування польотних даних БАС, виявлення і відновлення втрачених даних у місцях пропусків та коригування їх можливих аномальних значень з метою багатоальтернативної класифікації наявної польотної ситуації з подальшою візуалізацією отриманих результатів для аналізу рівня виконання польотного завдання.

Результати досліджень упроваджено в Науково-Навчальному центрі «Аерокосмічний центр» та в навчальному процесі Навчально-Наукового інституту Аеронавігації Національного Авіаційного Університету, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, виконаних у співавторстві, здобувачеві належить: у роботах [1, 17] виконано аналіз існуючих методів відновлення пропусків даних. Запропоновано метод відновлення втрачених польотних даних БПЛА з використанням сплайн- функції; у [2, 4, 9, 10, 14, 25] розроблено програмне забезпечення для декодування та візуалізації польотних даних БПЛА. Представлено спосіб структурування та кодування даних; у [3] розроблено програмне забезпечення для декодування та візуалізації польотних даних БПЛА за повідомленнями у форматі «MAVLink»; у [5, 29] виконано аналіз існуючих цифрових карт місцевості. Запропоновано методику обльоту перешкод БПЛА з використанням тривимірної цифрової карти місцевості; у [6] запропоновано принцип створення траєкторії БПЛА для обльоту перешкод складної форми з її мінімальним відхиленням; у [7, 20, 32] розроблено програмне забезпечення для моніторингу положення ПК, за декодуваною інформацією з подальшим відображенням на карті місцевості; у [8] розроблено спосіб позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків у повітрі, що можливо використовувати у якості резервного джерела координатної інформації на борту БПЛА; у [11] розроблено програмний комплекс уникнення зіткнень рухомих об'єктів з перешкодами; у [12] розроблено метод багатопараметричного відновлення даних у безпілотній авіаційній системі; у [13] проведено оцінювання точності альтернативних методів позиціонування для повітряного руху; у [15] проведено аналіз тенденцій розвитку безпілотних авіаційних систем. Виділені основні напрями їх технічного розвитку; у [16] виконано аналіз факторів, що впливають на функціонування безпілотних авіаційних систем; у [18] описані функціональні та оперативні вимоги до наземних станцій керування. Представлено аналіз існуючих наземних станцій керування; у [19] описано модифіковане програмне забезпечення для стратегічного планування та оцінювання результатів розподілу ресурсів у аеронавігаційній системі України SPPAT(Strategic Planning and Performance Assessment Tool); у [21, 34] проведено аналіз існуючих систем управління інформацією в ОПР, представлено розроблену систему для управління метеорологічною інформацією; у [22, 23] розглянуто задачу

багатоальтернативної класифікації польотної ситуації для БПЛА; у [24] проаналізовано рівні автономності сучасних безпілотних авіаційних систем; у [26] виконано аналіз передачі повідомлень польотної інформації через канал інформаційного обміну для завдань моніторингу повітряного руху; у [27] розроблено програмне забезпечення для формування всевітньої бази даних відомостей про аеропорти, що можуть бути використані при виконанні аеронавігаційних завдань; у [28] проведено аналіз існуючих способів створення цифрових карт місцевості для виконання польотних завдань БПЛА; у [30, 31] проведено аналіз існуючих методів усунення зіткнень БПЛА; у [33] виконано аналіз існуючого обладнання супутникового зв'язку для цифрового обміну даними між бортовим обладнанням та наземною станцією спостереження. Розглянуто функціональні можливості обладнання.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи обговорювалися на: Міжнародній конференції «Methods and systems of navigation and motion control» (м. Київ, НАУ, 2016), Міжнародній науково-технічній конференції «АВІА-2015», «АВІА-2013» та «АВІА-2011» (м. Київ, НАУ), Міжнародних науково-технічних конференціях студентів та молодих вчених «Політ-2012», «Політ-2011», «Політ-2010» (м. Київ, НАУ), Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та молодих учених «Проблеми навігації і управління рухом» (м. Київ, НАУ, 2011, 2010 роки), Всесвітньому конгресі «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології» (м. Київ, НАУ, 2014, 2012, 2010 роки), Науково-методичній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (м. Київ, НАУ, 2014, 2012, 2011 роки), Науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики» (м. Київ, НАУ, 2015, 2014, 2013, 2012 роки), Міжнародній конференції «Актуальні проблеми розвитку безпілотних літальних апаратів» (м. Київ, НАУ, 2013), Міжнародній математичній конференції «Диференціальні рівняння, обчислювальна математика, теорія функцій та математичні методи механіки» (м. Київ, КНУ ім. Тараса Шевченка, 2014).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 34 друкованих працях: 7 статтях у збірниках фахових наукових праць, з яких 6 містяться у наукометричних базах даних, 23 тезах доповідей, патенті та 3 свідцтвах про реєстрацію авторського права на твір.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 152 сторінки, в тому числі 120 сторінок основного тексту, ілюстрованих 64 рисунками та 10 таблицями. Список використаних джерел містить 105 найменувань на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** до дисертації міститься обґрунтування актуальності теми досліджень, зв'язок роботи з науковими темами, визначено об'єкт та предмет досліджень, сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи, подані основні результати, що відображають наукову новизну, та описано їх практичне значення, а також наведено апробації основних положень дисертації, публікацій, особистий внесок здобувача та структуру і обсяг дисертації.

У **першому розділі** визначено роль БАС у сьогоденні. Наведено класифікацію БПЛА за ризиком зіткнення із земною поверхнею, за висотою польоту, за рівнями автономності. Також, представлено узагальнюючу класифікацію БПЛА. Проведено аналіз можливих галузей застосування БАС.

Розглянуто структуру побудови типової БАС. Проаналізовано бортове обладнання БПЛА, наведено їх функціональні особливості. Розглянуто тенденції розвитку БПЛА до 2035 року відповідно до нормативних документів. Виділено основні напрямки технічного розвитку БАС, що відображають стратегічні пріоритети.

Проаналізовано фактори, які впливають на функціонування БАС, з яких виділено три основні зони їх дії: конструкцію БАС, її функціонування та вплив людського чинника. Наведено принципи множинної класифікації ситуацій. Проведено аналіз класифікації ситуацій для літаків, БПЛА цивільного та військового призначення.

Виділено основні підходи для аналізу польотної інформації. Проведено класифікацію методів відновлення даних. Для відновлення пропусків польотних даних виділено наступні групи методів: статистичні методи імпутації даних, методи засновані на моделі породження пропусків, методи з використанням математичної моделі, методи засновані на машинному інтелекті. Наведені переваги та недоліки кожного з методів.

Визначено коло основних взаємопов'язаних задач, вирішення яких необхідне для досягнення поставленої мети роботи.

У **другому розділі** розроблено новий метод багатопараметричного відновлення польотних даних, що у процесі оцінювання втраченої інформації використовує значення наявних польотних параметрів БПЛА та враховує похибки вимірювального обладнання. Структурну схему розробленого методу показано на рис.1.

Обладнання БАС постійно виконує вимірювання параметрів системи та іншої інформації (наприклад навколишнього середовища). Результати вимірювань формують матриці вимірювальних параметрів та фіксуються у відповідних файлах даних. Окрім результатів вимірювання, датчики БАС надають матриці стану вимірювального обладнання. Дані про достовірність вимірювальних параметрів є важливими для функціонування БАС. У якості

достовірності правильного функціонування використовуються разові команди справності параметра, датчика або системи. При цьому, оцінювання достовірності параметра виконується джерелом цієї інформації або спеціальною системою моніторингу працездатності обладнання. Відповідно до цього, передбачається надходження разом з даними БАС, даних про справність джерел, що генерують ці дані у двійковому вигляді. Після декодування разових команд стану датчиків виконується вибір наявних даних та визначаються часові відліки їх втрати, шляхом порівняння разових команд з даними, що надходять.



Рис. 1. Структурна схема розробленого методу багатопараметричного відновлення польотних даних

На наступному етапі виконується пошук аномальних даних, що є результатом дії випадкових похибок під час вимірювання. Для перевірки аномальних значень можуть бути використані наступні критерії: Ірвіна, Романовського, варіаційного розмаху, Анскомба, Діксона, трьох сигм, Смирнова, Шарльє, Шовене та інші. Для достовірного визначення

аномальних значень перевірку необхідно виконувати відразу за декількома критеріями. На основі власних досліджень, рекомендується використовувати не менше трьох із них. Остаточне рішення про наявність аномальних даних приймається за більшістю критеріїв. Аномальні дані значно відрізняються від решти вимірювань та мають бути виправлені, тому вони вважаються помилковими та помічаються як втрачені, а часові відліки їх появи позначаються як відліки втрачених даних, для яких у подальшому буде здійснюватися відновлення. Аномальні значення видаляються з наявних даних, а за рештою інформації формуються матриці параметрів, що будуть використані для процесу відновлення.

Відновлення втрачених даних виконується за допомогою сплайн-функцій з використанням багатьох наявних параметрів.

За відомими параметрами та їх часовими відліками виконується вибір вузлових точок, розраховуються базисні функції та оцінюються коефіцієнти сплайн-функцій. Оцінені коефіцієнти використовуються для оцінювання значень параметрів на час їх пропуску.

На останньому етапі відновлені параметри поєднуються з наявними даними та формуються матриці, що містять «повні» дані.

Для вирішення поставленої задачі використовуються B -сплайни, що визначаються математичною залежністю:

$$S(t) = \sum_{j=1}^{N+3} x_j B_j(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

де x_j – вектор коефіцієнтів сплан-функцій, $B_j(t)$ – базисні функції B -сплайну, N – кількість вузлів.

У якості базисної функції B -сплайну використано співвідношення Кокс-Де Бура, що визначає j -ту базисну функцію B -сплайну певного степеня у певний момент часу t :

$$B_{j,m}(t) = \frac{t - \tau_j}{\tau_{j+m-1} - \tau_j} B_{j,m-1}(t) + \frac{\tau_{j+m} - t}{\tau_{j+m} - \tau_{j+1}} B_{j+1,m-1}(t),$$

де j – номер базисної функції, m – ступінь B -сплайну, τ – матриця вузлів сплайну.

За сформованими матрицями параметрів коефіцієнти сплайн-функцій оцінюються за залежністю:

$$\text{vec}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n \text{vec}(\bar{a}_i \bar{y}_i^T S_i^{-1})}{\sum_{i=1}^n \left((S_i^{-1})^T \otimes (\bar{a}_i \bar{a}_i^T) \right)}, \quad a = \begin{bmatrix} B_1(t_i) \\ B_2(t_i) \\ \vdots \\ B_{N+3}(t_i) \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_k(t) \end{bmatrix}, \quad S_i = \begin{bmatrix} \sigma_{i,1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_{i,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{i,k} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де a – матриця базисних функцій, y – матриця результатів вимірювань k параметрів руху у час t , n – кількість вимірювань, S_i – діагональна матриця похибок вимірювального обладнання.

Векторизована матриця $vec(X)$ являє собою вектор-стовпчик, в якому згори вниз розташовані послідовно перший, другий і т.п. k -й стовпчики матриці X . Тобто, якщо

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,k} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(N+3),1} & x_{(N+3),2} & \cdots & x_{(N+3),k} \end{bmatrix},$$

тоді:

$$vec(X)^T = [x_{1,1} \cdots x_{(N+3),1} \quad x_{1,2} \cdots x_{(N+3),2} \cdots x_{1,k} \cdots x_{(N+3),k}].$$

Виконавши обернену операцію до векторизації матриці, отримуються оцінені значення матриці контрольних точок X .

Розрахунок втрачених даних виконується за загальною формулою для B -сплайнів (1), що у матричному вигляді з урахуванням матриці справності параметрів J матиме наступний вигляд:

$$S(t_i) = JX^T a_i, \quad (3)$$

де $i=[1, n]$, $J=[j_1(t), j_2(t), \dots, j_k(t)]^T$.

Значення матриці справності параметрів заповнюються з таблиці разових команд для певного часового відліку. У випадку справності – 0, та у випадку несправності – 1.

Таким чином, вибір параметрів, необхідних для відновлення, виконується за допомогою матриці справності на певний часовий відлік.

Похибка відновлення даних розраховується за формулою:

$$R(t) = \sigma_0^2 \sum_{i=1}^n \bar{a}_i \Phi^{-1} \bar{a}(t) \bar{a}^T(t) \Phi^{-1} \bar{a}_i^T S_i, \quad (4)$$

$$\text{де } \Phi = \sum_{i=1}^n \frac{a_i a_i^T}{\sigma_i^2}, \quad \hat{\sigma}_0^2 = \frac{1}{n - k(N+3)} \sum_{i=1}^n \frac{S^{-1}(\bar{y}_i - X^T a_i)^T \times (\bar{y}_i - X^T a_i)}{\sigma_i^2}.$$

У **третьому розділі** виконано адаптацію багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій до застосування у БАС за критерієм відхилення параметрів від запланованих значень з урахуванням відновлених даних. Використано п'яти класову класифікацію польотних ситуацій, що складається з нормальної ситуації (НС), ускладнення умов польоту (УУП), складної (СС), аварійної (АС) та катастрофічної ситуації (КС).

Запропоновано відмовитись від критеріїв впливу на людей, навколишнє середовище та матеріальні затрати, у якості основоположних для класифікації. Адже, кожен з цих критеріїв може бути елементом польотного завдання БПЛА. Наприклад, у випадку військового застосування БАС, людські жертви можуть бути частиною польотного завдання. Відповідно до цього, критерій людських жертв не є визначальним для оцінювання виконання польотного завдання.

Кожен клас ситуації визначається значенням апіорної ймовірності з нормативних документів для кожного класу БПЛА окремо. Розрахунок метрики ситуацій представлено на рис.2. Удосконалений метод для оцінювання наявного класу ситуації представлено у вигляді структурної схеми, наведеної на рис.3. Оцінювання граничних значень для кожної з польотних ситуацій виконується наступним чином:

$$Z = \Phi^{-1}\left(P - \frac{1}{2}\right)\sigma + Z_{\text{НС}},$$

де $P^T = [P_{\text{УУП}}, P_{\text{СС}}, P_{\text{АС}}, P_{\text{КС}}]$, $Z^T = [Z_{\text{УУП}}, Z_{\text{СС}}, Z_{\text{АС}}, Z_{\text{КС}}]$, Φ – функція Лапласа.

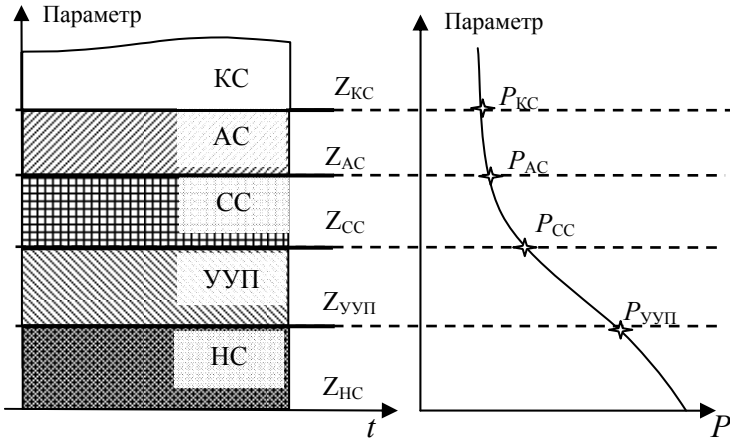


Рис. 2. Вибір метрики ситуацій

Оцінювання класу наявної польотної ситуації виконується за критерієм Байеса. Відповідно до якого за кожним з класів ситуацій закріплюється певна щільність нормального розподілу та обчислюється апостеріорна ймовірність наявності кожного з класів польотної ситуації:

$$q_k(x_s) = \frac{p_k \rho_k(x_s)}{\sum_{k=1}^N p_k \rho_k(x_s)},$$

де N – кількість класів, n – кількість вимірювань одного параметра, s – індекс відповідного параметра, $k=[1, N]$ – індекс відповідного класу, $\rho_k(x_s)$ – умовна ймовірність для k -го класу, $p=[P_{HC}, P_{УУП}, P_{CC}, P_{AC}, P_{KC}]$ – апіорна ймовірність класів.



Рис. 3. Структурна схема удосконаленого методу багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій БПЛА

У якості умовної щільності ймовірності $\rho_k(x)$ використано щільність багатопараметричного нормального розподілу у вигляді:

$$\rho_k(x) = \frac{1}{(2\pi)^{K/2} |B|^{-1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(B^{-1} (x - \mu)^T \times (x - \mu) \right) \right],$$

де K – кількість параметрів, $x = (x_1, x_2, \dots, x_s)$ – вектор результатів вимірювань всіх параметрів, $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_s)$ – вектор математичних сподівань для кожного з параметрів, B – матриця середньоквадратичних відхилень:

$$B = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1s} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \dots & \sigma_{2s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{s1} & \sigma_{s2} & \dots & \sigma_s^2 \end{pmatrix}.$$

На рис. 4. наведено умовні щільності ймовірностей класів ситуацій у випадку виникнення катастрофічної ситуації при відхиленні за 90 м від запланованої траєкторії руху, а на рис. 5. – результати обчислення апостеріорних ймовірностей для кожної з ситуацій.

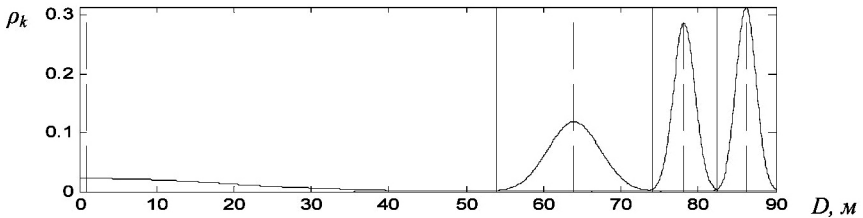


Рис. 4. Умовні щільності ймовірностей класів ситуацій

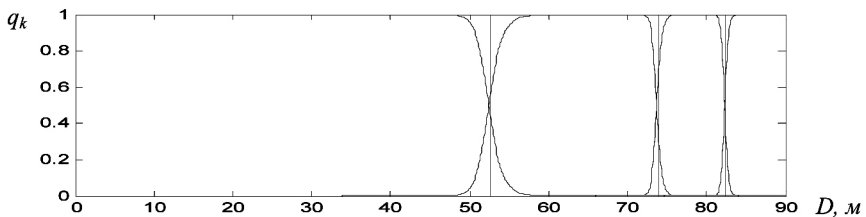


Рис. 5. Апостеріорні ймовірності класів ситуацій

У **четвертому розділі** проведено верифікацію розроблених методів шляхом комп'ютерного моделювання та експериментальних випробувань.

Верифікацію методів виконано з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, що дозволяє змоделювати траєкторію руху БПЛА за заданими параметрами та дослідити функціонування методу багатопараметричного відновлення даних у БАС, а також розпізнати клас наявної польотної ситуації.

Для дослідження характеристик відновлення даних було змодельовано пропуск даних системи позиціонування. Проміжок втрачених даних було використано для відновлення значень відповідних параметрів розробленим методом. Для дослідження багатоальтернативної класифікації було введено незаплановане відхилення БПЛА від запланованої траєкторії руху шляхом зміну курсу, що призвело до зміни класу ситуації від нормальної до ускладнення умов польоту.

Для дослідження функціонування методу багатопараметричного відновлення польотних даних у реальних умовах було проведено експеримент на полігоні «Ходосівка» (широта – 50.27° N, довгота – 30.53° E). Експеримент полягав у розгортанні БАС та виконанні польотного завдання за заданою траєкторією з фіксацією параметрів для подальшого аналізу.

Під час експерименту використовувався БПЛА «Cessna N877S», укомплектований бортовою апаратурою «Panda-II». Польотні дані передавалися по радіоканалу на наземну станцію керування для візуалізації та збереження.

Під час експериментального польоту був виконаний підйом БПЛА на задану висоту та перехід у автоматичний режим польоту за заздалегідь заданою траєкторією руху. Траєкторія руху БПЛА представлена на рис. 6.



Рис. 6. Траєкторія руху БПЛА

У якості пропуску даних довільним чином, було обрано п'яти-секундний проміжок польоту. Результати відновлення втрачених даних за розробленим методом наведено на рис. 7 – 9, а відхилення БПЛА від запланованої траєкторії руху наведено на рис. 10.

Результати розпізнавання наявного класу польотної ситуації БПЛА, вказують на нормальний політ БПЛА на представленому часовому проміжку. Ці результати пояснюються тим, що політ БПЛА відбувся за відсутності дії екстремального впливу зовнішніх факторів на функціонування БАС (зокрема таких як: вітер, турбулентність, завади у радіоканалі). Результати

класифікації польотної ситуації залежать від вибору гранично допустимої величини відхилення від запланованої траєкторії руху БПЛА. У загальному випадку ці межі повинні визначатися зоною дії керування БАС, польотними характеристиками БПЛА, наявними штучними чи природними перешкодами, іншими рухомими об'єктами, що можуть стати на заваді виконання польотного завдання. Порівняльний аналіз різних методів відновлення пропусків даних представлений у таблиці.

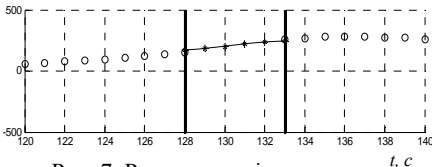


Рис. 7. Результати відновлення координати X місцеположення БПЛА

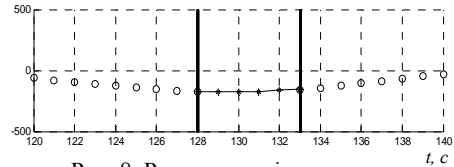


Рис. 8. Результати відновлення координати Y місцеположення БПЛА

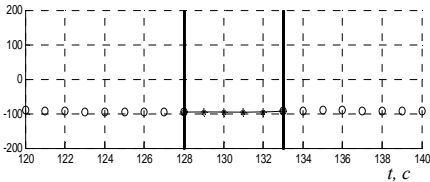


Рис. 9. Результати відновлення координати Z місцеположення БПЛА

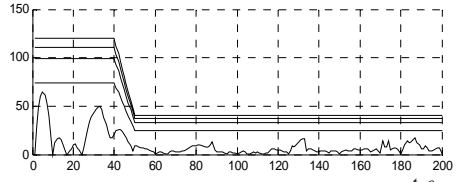


Рис. 10. Відхилення від запланованої траєкторії руху

Таблиця – Статистичні характеристики різних методів відновлення втрачених даних

Метод відновлення	Середньоквадратичне відхилення, м	Математичне сподівання, м	Максимальне значення похибки, м	Мінімальне значення похибки, м	Коефіцієнт детермінації
Лінійна інтерполяція	33,7	76,5	115,6	22,3	0,8
Інтерполяція C^1 сплайном	39,0	65,9	114,9	14,4	0,9
Ступінчаста інтерполяція	68,8	76,4	142,9	9,4	0,002
Метод багатопараметричного відновлення даних	11,2	9,8	24,3	0,4	0,9

Ефективність запропонованого методу багатопараметричного відновлення даних підтверджується порівнянням отриманих результатів з результатами застосування інших методів відновлення даних.

ВИСНОВКИ

Результати дисертаційної роботи спрямовані на розвиток теорії обробки та відновлення даних, а також теорії управління безпекою польотів за багатоальтернативною класифікацією польотних ситуацій, що характеризують відхилення параметрів польоту БПЛА від запланованих значень.

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу багатопараметричного відновлення втрачених даних та багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій БПЛА.

При цьому отримано такі результати:

1. Розроблено метод багатопараметричного відновлення польотних даних у БАС, що використовує наявні параметри польоту та їх попередні виміри для заповнення пропусків даних чи коригування аномальних значень та враховує похибки вимірювального обладнання. Виведено математичну залежність для оцінювання величини похибки відновлення даних.

2. Адаптовано багатоальтернативну класифікацію польотних ситуацій для застосування у БАС, що дозволить оцінити вдаль виконання польотного завдання та враховує відмінності безпілотної авіації від пілотованої, а також складність та особливості виконання польотного завдання БПЛА.

3. Удосконалено метод багатоальтернативної класифікації для оцінювання класу наявної польотної ситуації БПЛА за величезною відхилення параметрів польоту від запланованих значень з використанням метрики багатоальтернативної класифікації для застосування до наявних та відновлених даних у БАС, що дозволяє розпізнавати польотну ситуацію БПЛА та оцінювати результативність виконання польотного завдання.

4. Розроблено спеціалізоване програмно-алгоритмічне забезпечення та виконано верифікацію розробленого методу багатопараметричного відновлення польотних даних за допомогою комп'ютерного моделювання. Виконано моделювання руху БПЛА та моделювання втрати деяких параметрів у певні проміжки часу. Досліджено результати багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій на час втрати даних та відхилення БПЛА від запланованої траєкторії. Оцінено та проаналізовано похибки відновлення даних. Результати комп'ютерного моделювання показали, що похибки знаходились у межах нормальної ситуації та не призвели до погіршення польотної ситуації. Отримані результати вказують на достовірність та доцільність використання запропонованого методу для відновлення втрачених даних у БАС.

Розроблено спеціалізоване програмно-алгоритмічне забезпечення для декодування та візуалізації польотних даних, що дозволяє оператору БПЛА контролювати польотну ситуацію шляхом декодування, обробки та візуалізації польотних даних, які фіксуються в файл засобами наземної станції керування або в бортовій пам'яті БПЛА. З використанням розробленого програмного забезпечення проведено експериментальні випробування розроблених методів, що підтверджують ефективність та доцільність їх використання.

Запропонований метод багатопараметричного відновлення польотних даних дозволяє заповнити пропуски в даних БАС за сукупністю наявних параметрів. Представлений набір класів польотних ситуацій враховує специфіку БАС та застосовується для визначення критерію вдалого виконання польотного завдання. Результати розпізнавання наявного класу польотної ситуації за величиною відхилення параметрів польоту від запропонованих значень підвищують ситуаційну обізнаність оператора БАС та сприяють вчасному прийняттю рішення щодо можливих змін у польотному завданні, що позитивно вплине на безпеку авіації.

Основні результати роботи становлять наукову основу для створення новітніх систем обробки та відновлення польотних даних у БАС в умовах переходу до нових концепцій виконання польотів БПЛА.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kharchenko V. Unmanned aerial vehicle flight data processing by spline approach / V. Kharchenko, N. Kuzmenko // Proceeding of the NAU. – 2015. – № 1. – pp. 21–25.
2. Mykhatsky O. Measurement, post-processing, analysis and visualization of the experimental flight data / O. Mykhatsky, N. Kuzmenko, O. Savchenko // Electronics and control systems. – 2013. – № 3. – pp. 33–38.
3. Кузьменко Н. С. Обробка, аналіз та візуалізація польотних даних безпілотного літального апарату / В. П. Харченко, М. М. Богуненко, Н. С. Кузьменко, О. В. Шостак, К. Ю. Шарак // Вісник інженерної академії України. – 2014. – №2. – С. 20–25.
4. Kharchenko V. Experimental Unmanned Aerial Vehicle flight data measurement and their post-processing analysis / V. Kharchenko, N. Kuzmenko, O. Mykhatsky, O. Savchenko // Proceeding of the NAU. – 2014. – № 1. – pp. 11–16.
5. Kharchenko V. Unmanned aerial vehicle collision avoidance using digital elevation model / V. Kharchenko, N. Kuzmenko // Proceeding of the NAU. – 2013. – № 1. – pp. 18–21.
6. Kharchenko V. Minimization of UAV trajectory deviation during the complicated obstacles overfly/ V. Kharchenko, N. Kuzmenko // Proceeding of the NAU. – 2012. – № 2. – pp. 18–21.
7. Ostroumov I. Application for aircraft tracking / I. Ostroumov, N. Kuz'menko // Proceeding of the NAU. – 2011. – № 3. – pp. 43–48.
8. Патент 98724 Україна. Спосіб позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків / І. В. Остроумов, Н.С. Кузьменко. – заявл. 2014-10-07; опубл. 2015-05-07.

9. А. С. 57944 України. Комп'ютерна програма «Візуалізація параметрів безпілотних літальних апаратів» / М. М. Богуненко, Н. С. Кузьменко, О. В. Шостак, К. Ю. Шарак. – заявл. 05.11.2014; опубл. 30.12.14.
10. А. С. 58313 України. Комп'ютерна програма «Програмне забезпечення для декодування та візуалізації польотних даних» / Н. С. Кузьменко, В. П. Харченко. – заявл. 28.11.2014; опубл. 27.01.15.
11. А. С. 58315 України. Комп'ютерна програма «Програмний комплекс уникнення зіткнень рухомих об'єктів з перешкодами» / Н.С. Кузьменко, В.П. Харченко. – заявл. 28.11.2014; опубл. 27.01.15.
12. Kharchenko V. Multi-parametric data recovery for unmanned aerial vehicle navigation system / V. Kharchenko, N. Kuzmenko, A. Kukush, I. Ostroumov // 2016 IEEE 4th International Conference «Methods and Systems of Navigation and Motion Control»(MSNMC), October 18-20, – 2016:proceedings. – 2016. – pp. 295–299.
13. Ostroumov I. Accuracy estimation of alternative positioning in navigation / I. Ostroumov, N. Kuzmenko // 2016 IEEE 4th International Conference «Methods and Systems of Navigation and Motion Control» (MSNMC), October 18-20, – 2016: proceedings. – 2016. – pp. 291–294.
14. Mykhatsky O. Experimental UAV Flight data structuring, transmission and visualization by narrowband telemetry transmission / O. Mykhatsky, N. Kuzmenko, O. Savchenko // Proceedings of 2013 IEEE 2nd International Conference "Actual problems of Unmanned Air Vehicles Developments". October 15-17, 2013: theses. – К., 2013. – pp. 118–121.
15. Кузьменко Н. С. Основні тенденції розвитку безпілотних авіаційних систем / Н. С. Кузьменко, І. В. Остроумов // Матеріали XII Міжнар. науково-техн. конф. “АВІА-2015”, 28-29 квітня 2015р. –2015. – С. 8.35–8.38.
16. Кузьменко Н.С. Аналіз факторів, що впливають на функціонування безпілотних авіаційних систем // Матеріали XII Міжнар. науково-техн. конф. “АВІА-2015”. – К. : НАУ, 2015.– С. 8.58–8.61.
17. Kuzmenko N. Spline as a universal mean for continuous UAV parameters processing // The Sixth World Congress “Aviation in the XXI-st century” – "Safety in Aviation and Space Technologies". Vol. 2. – Kyiv: NAU, 2014. – pp. 3.2.6–3.2.9.
18. Кузьменко Н. С. Наземні станції керування польотом рухомого об'єкта повітряного простору / Н. С. Кузьменко, І. В. Васильєв // Матеріали XI Міжнар. науково-техн. конф. “АВІА-2013”. – Том 2. – К.: НАУ. – 2013. – С. 8.49–8.53.
19. Kuzmenko N. Software for strategic planning and performance assessment in Ukraine / N. Kuzmenko // The Fifth World Congress “Aviation in the XXI-st century” – "Safety in Aviation and Space Technologies". Vol. 2. – Kyiv: NAU, 2012. – pp. 3.2.18–3.2.20.
20. Остроумов І. В. Моніторинг повітряного руху за повідомленнями ACARS / І. В. Остроумов, Н. С. Кузьменко // Авіа-2011 : міжнародна науково-технічна конференція, 19–21 квітня 2011 р. : матеріали конференції. – Т.2. – К., 2011. – С. 7.44–7.47.
21. Kuzmenko N. Weather Web Service / N. Kuzmenko, I. Ostroumov // The Fourth World Congress “Aviation in the XXI-st century” – "Safety in Aviation and Space Technologies". Vol. 1. – Kyiv: NAU, 2010. – pp. 21.93–21.96.
22. Кузьменко Н.С. Багатоальтернативна класифікація ситуацій польотного стану БАС / Н.С. Кузьменко // IV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики». 28–29 жовтня. – К., 2015. – 6 с.
23. Kukush A. Construction of confidence ellipsoids for dynamic system state prediction based on correlated observations / A. Kukush, N. Kuzmenko // Матеріали міжнародної

- математичної конференції «Диференціальні рівняння, обчислювальна математика, теорія функцій та математичні методи механіки», 23-24 квітня – К: 2014. – С. 146.
24. Кузьменко Н. С. Рівні автономності сучасних безпілотних авіаційних систем / Н. С. Кузьменко // III Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики». 29–30 жовтня. – К., 2014. – 10 с.
 25. Kuzmenko N. UAV flight data decoding, processing and visualization tool / N. Kuzmenko // Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики», 23–24 жовтня – К., 2013. – С. 18.
 26. Ostroumov I. ADS-B tracking in Ukrainian airspace / I. Ostroumov, N. Kuzmenko // Матеріали науково-методичної конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS / ATM », 17–19 листопада. – Київ : НАУ, 2014. – С. 70.
 27. Кузьменко Н.С. Всесвітня база даних відомостей про аеропорти / Н.С. Кузьменко, І. В. Остроумов // тези науково-практичного семінару «Сучасні проблеми авіакосмічних технологій та систем» 23–27 травня. – К.: – 2011. – С. 17.
 28. Kuzmenko N. The prominent role and usage of digital elevation models in aviation / N. Kuzmenko // Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики», 24–25 жовтня. – К., 2012. – С. 58.
 29. Kuzmenko N. UAV collision avoidance during the mission // N. Kuzmenko // Матеріали науково-методичної конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ ATM», 28–30 листопада. – Київ: НАУ, 2012. – С. 73.
 30. Kuzmenko N. UAV conflict detection during the mission / N. Kuzmenko // Матеріали XII міжнар. наукової конф. студентів та молодих учених “Політ–2012”. – Київ, 4–5 квітня. – К. : НАУ, 2012. – С. 4.
 31. Kuzmenko N. Actuality and necessity of UAV’s collision avoidance / N. Kuzmenko, I. Ostroumov // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «Проблеми навігації і управління рухом», 21–22 листопада. – Київ: НАУ, 2011. – С. 36.
 32. Kuz'menko N. Tracking with ACARS reports / N. Kuz'menko // Матеріали XI міжнар. наукової конф. студентів та молодих учених “Політ–2011”. – Київ, 6-7 квітня 2011 р. – К.: НАУ, 2011. – С. 56.
 33. Kuz'menko N. Equipment for satellite communication/ N. Kuz'menko // Матеріали X міжнар. наукової конф. студентів та молодих учених “Політ–2010”. 7–9 квітня. – К. : НАУ, 2010. – С. 44.
 34. Kuzmenko N. Information management in air traffic / N. Kuzmenko, I. Ostroumov // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «Проблеми навігації і управління рухом», 23–24 листопада. – К. : НАУ, 2010. – С. 33.

АННОТАЦИЯ

Кузьменко Н.С. Многопараметрическое восстановление данных в беспилотной авиационной системе с многоальтернативной классификацией полётных ситуаций. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.13 – Навигация и управление движением, Национальный авиационный университет, г. Киев, 2017.

Диссертация посвящена вопросам восстановления пропусков полетных данных в БАС, а также многоальтернативной классификации ситуаций, характеризующие отклонения параметров БПЛА за пределы разрешенных значений в соответствии со степенью опасности.

Разработан метод многопараметрического восстановления пропусков полетных данных в БАС, что использует информацию об имеющихся параметрах полета для заполнения пропусков данных или коррекции аномальных значений и учитывает погрешности измерительного оборудования.

Дальнейшего развития получила многоальтернативная классификация полетных ситуаций БПЛА для анализа незапланированных отклонений параметров от заданных значений, учитывая восстановленные данные у БАС предложенным методом. Усовершенствован метод многоальтернативной классификации для оценки вероятности класса имеющейся полетной ситуации, на основе расчета величин отклонений параметров БПЛА от запланированных значений параметров и метрики классов.

Проведено верификацию разработанных методов путем компьютерного моделирования и экспериментальных испытаний. Разработано специализированное программное обеспечение для декодирования и визуализации полётных данных, которое позволяет оператору БПЛА контролировать выполнение полётного задания. Результаты распознавания текущего класса ситуации по величине отклонения параметров от запланированных значений повысят ситуационную осведомлённость оператора и будут сопутствовать своевременному принятию решения касательно возможных изменений в полётном задании, что положительно повлияет на безопасность авиации.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система, восстановление данных, сплайн-функция, многоальтернативная классификация, величина отклонения, вероятность правильного распознавания.

АНОТАЦІЯ

Кузьменко Н.С. Багатопараметричне відновлення даних у безпілотній авіаційній системі з багатоальтернативною класифікацією польотних ситуацій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – Навігація та управління рухом, Національний авіаційний університет, м. Київ, 2017.

Дисертацію присвячено питанням відновлення втрачених польотних даних у БАС, а також багатоальтернативній класифікації ситуацій, що характеризують відхилення параметрів БПЛА за межі дозволених значень відповідно до ступеня небезпеки. Розроблено метод багатопараметричного відновлення втрачених польотних даних у БАС, що використовує інформацію про наявні параметри польоту для заповнення пропусків даних та враховує похибки вимірювального обладнання. Подальший розвиток дістала багатоальтернативна класифікація польотних ситуацій БПЛА для аналізу незапланованих відхилень параметрів від заданих значень, що враховує відновлені дані у БАС запропонованим методом. Удосконалено метод багатоальтернативної класифікації для оцінювання ймовірності класу наявної польотної ситуації на основі розрахунку величин відхилень параметрів БПЛА від запланованих значень та метрики класів. Проведено верифікацію розроблених методів шляхом комп'ютерного моделювання та експериментальних випробувань.

Ключові слова: безпілотна авіаційна система, відновлення даних, сплайн-функція, багатоальтернативна класифікація, величина відхилення, ймовірність правильного розпізнавання.

ABSTRACT

N. Kuzmenko. Multiparametric data recovering in unmanned aerial system with multi-choice classification of flight situations. – Manuscript.

The thesis for reception of scientific degree of engineering sciences candidate under 05.22.13 specialty – Navigation and movement management, National Aviation University, Kyiv, 2017.

The thesis is dedicated to problems of missing UAS flight data recovering bases and multi-choice classification of situations that characterize the deviation of UAV parameters beyond the permitted values according to the degree of danger.

The method of multiparameteric recovering of missing UAS data that uses available flight information to fill data gaps and takes into account the measurement errors was developed. Further development of the multi-choice classification of UAV flight situations to analyze unplanned deviations from the set trajectory that takes into account the recovered UAS data by proposed method was done. An improved method for evaluating the probability of an existing flight situation class on the basis of UAV parameters deviations calculation from the planned values and classes metrics was developed. A verification of developed methods by computer simulation and experimental tests was done.

Keywords: unmanned aerial system, data recovery, spline-function, multi-choice classification, deviation value, the probability of correct recognition.

Підп. до друку 16.01.2017. Формат 60×84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл. вид. арк. 1,25.
Тираж 100 прим. Замовлення № 6-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680, Київ–58, пр-т Космонавта Комарова, 1.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру серія ДК № 977 від 05.07.2002