

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Кузьменко Наталія Сергіївна

УДК 004.032.2:629.7.014–519.05 (043.5)

**Багатопараметричне відновлення даних у безпілотній авіаційній системі з
багатоальтернативною класифікацією польотних ситуацій**

Спеціальність 05.22.13 – "Навігація та управління рухом"

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Науковий керівник

Харченко Володимир Петрович,

заслужений діяч науки і техніки,
лауреат Державної премії
України в галузі науки і техніки,
доктор технічних наук,
професор, проректор з наукової
роботи НАУ

Київ – 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 БЕЗПЛОТНІ АВІАЦІЙНІ СИСТЕМИ	16
1.1 . Роль безпілотних авіаційних систем	16
1.1.1 . Класифікація БАС	19
1.1.2 . Застосування БАС	21
1.2 . Архітектура БАС	23
1.2.1 . Структура БАС	23
1.2.2 . Обладнання безпілотного літального апарату	25
1.2.3 . Тенденції розвитку	28
1.3 . Необхідність класифікації польотних ситуацій	31
1.3.1 . Фактори, які впливають на функціонування БАС	31
1.3.2 . Принципи множинної класифікації ситуацій	35
1.4 . Відновлення польотної інформації	38
1.4.1 . Підходи до аналізу польотної інформації	38
1.4.2 . Природа пропусків даних	40
1.4.3 . Класифікація методів відновлення даних	40
1.5 . Постановка задач дослідження	46
Висновки до розділу 1	48
РОЗДІЛ 2 МЕТОД БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ	
ДАНИХ У БЕЗПЛОТНІЙ АВІАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ	50
2.1 . Суть методу	50
2.2 . Вибір сплайн-функції	52
2.3 . Оцінювання коефіцієнтів сплайн-функцій	56
2.4 . Вибір вузлових точок сплайн-функцій	64
2.5 . Оцінювання втрачених даних у БАС	67
2.6 . Виявлення аномальних значень результатів вимірювань параметрів	69
2.7 . Оцінювання похибки відновлення даних	74
2.8 . Оцінювання довірчого інтервалу до відновлених польотних даних	80

	3
Висновки до розділу 2	85
РОЗДІЛ 3 БАГАТОАЛЬТЕРНАТИВНА КЛАСИФІКАЦІЯ	
ПОЛЬОТНИХ СИТУАЦІЙ БПЛА.....	87
3.1 . Формалізація польотних ситуацій.....	87
3.2 . Побудова класів польотних ситуацій БПЛА.....	94
3.3 . Оцінювання класу ситуації з урахуванням відновлених даних.....	99
Висновки до розділу 3	106
РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО	
ВІДНОВЛЕННЯ ПОЛЬОТНИХ ДАНИХ ТА	
БАГАТОАЛЬТЕРНАТИВНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ.....	107
4.1 . Програмно-алгоритмічне забезпечення декодування та візуалізації	
польотних даних	107
4.1.1 . Призначення програмного забезпечення.....	107
4.1.2 . Функціонування програмного забезпечення.....	108
4.1.3 . Особливості використання програмного забезпечення.....	116
4.2 . Верифікація методів шляхом комп'ютерного моделювання	116
4.2.1 . Опис програмного забезпечення моделювання	116
4.2.2 . Результати комп'ютерного моделювання	120
4.3 . Апробація методів шляхом експериментальних випробувань	126
4.3.1 . Опис експерименту	126
4.3.2 . Результати експериментальних випробувань	131
Висновки до розділу 4	139
ВИСНОВКИ.....	141
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	143
<i>Додаток А. Розроблені комп'ютерні програми.....</i>	<i>153</i>
<i>Додаток Б. Візуалізація польотної інформації за розробленим програмно-алгоритмічним забезпеченням.....</i>	<i>163</i>
<i>Додаток В. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи, патент на корисну модель та свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір</i>	<i>175</i>

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АС	Аварійна ситуація
БАС	Безпілотна авіаційна система
БПЛА	Безпілотний літальний апарат
БСК	Базова станція керування
КІО	Канал інформаційного обміну
КПР	Керування повітряним рухом
КС	Катастрофічна ситуація
ЛА	Літальний апарат
НАТО	Організація Північноатлантичного договору
НС	Нормальна ситуація
НСК	Наземна станція керування
ОПР	Організація повітряного руху
ПК	Повітряний корабель
ПЗ	Програмне забезпечення
ПЗДВПД	Програмне забезпечення для декодування та візуалізації польотних даних
РЛС	Радіолокаційна станція
СС	Складна ситуація
УУП	Ускладнення умов польоту
<i>AGL</i>	<i>Above Ground Level</i> (висота над рільєфом місцевості)
<i>ASIC</i>	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i> (інтегральна схема для специфічного застосування)
<i>CDL</i>	<i>Common Data Link</i> (загальний канал передачі даних)
<i>CR</i>	<i>Close Range</i> (ближня дальність)
<i>DEC</i>	<i>Decoy</i> (БПЛА-пастка)

<i>EASA</i>	<i>European Aviation Safety Agency</i> (Європейське агентство з авіаційної безпеки)
<i>ECEF</i>	<i>Earth Centered Earth Fixed</i> (глобальній системі координат)
<i>EM</i>	<i>Expectation maximization</i> (максимальної достовірності)
<i>EXO</i>	<i>Exo-stratospheric</i> (надстратосферний БПЛА)
<i>FL</i>	<i>Flight level</i> (ешелон польоту)
<i>GCS</i>	<i>Ground control station</i> (наземна станція керування)
<i>GNSS</i>	<i>Global Navigation Satellite System</i> (глобальна навігаційна супутникова система)
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i> (глобальна система позиціонування)
<i>GUI</i>	<i>Graphical User Interface</i> (графічний інтерфейс)
<i>HALE</i>	<i>High altitude, long endurance</i> (БПЛА великої висоти польоту великої дальності)
<i>ICAO</i>	<i>International civil aviation organization</i> (Міжнародна організація цивільної авіації)
<i>JARUS</i>	<i>Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems</i> (група національних повноважних органів щодо розробки норм діяльності безпілотних систем)
<i>LADP</i>	<i>Low-Altitude Deep Penetration</i> (велика дальність на малій висоті)
<i>LALE</i>	<i>Low-Altitude Long-Endurance</i> (тривалий політ на малій висоті)
<i>LET</i>	<i>Lethal</i> (безпілотний ударний ЛА)
<i>LLA</i>	<i>Latitude Longitude Altitude</i> (довгота широта висота)
<i>MALE</i>	<i>Medium altitude, long endurance</i> (БПЛА середньої висоти польоту великої дальності)
<i>MAR</i>	<i>Missing at random</i> (випадкові пропуски)
<i>MATLAB</i>	<i>Matrix laboratory</i> (пакет прикладних програм для числового аналізу)
<i>MAV</i>	<i>Micro air vehicle</i> (мікро літальний літальний апарат)
<i>MCAR</i>	<i>Missing completely at random</i> (повністю випадкові пропуски)

<i>MEMS</i>	<i>Microelectromechanical systems</i> (мікро-електромеханічні системи)
<i>Micro</i>	Мікро
<i>Mini</i>	Міні
<i>MNAR</i>	<i>Missing not at random</i> (невипадкові пропуски)
<i>MR</i>	<i>Middle Range</i> (середня дальність)
<i>MRE</i>	<i>Middle Range Endurance</i> (середня дальність, тривалий політ)
<i>MSL</i>	<i>Mean Sea Level</i> (висота над рівнем моря)
<i>Nano</i>	Нано
<i>NED</i>	<i>North-East-Down</i> (локальна система координат)
<i>OPL</i>	<i>Open Pilot</i> (програмне забезпечення для візуалізації польотних даних)
<i>OSD</i>	<i>On screen display</i> (відображення на екрані)
<i>SATCOM</i>	<i>Satellite Communication</i> (супутниковий зв'язок)
<i>SPPAT</i>	<i>Strategic Planning and Performance Assessment Tool</i> (програмне забезпечення для стратегічного планування та оцінювання результатів розподілу ресурсів у аеронавігаційній системі)
<i>SR</i>	<i>Small Range</i> (мала дальність)
<i>STANAG</i>	<i>Standardization Agreement</i> (угода зі стандартизації в НАТО)
<i>SESAR</i>	<i>Single European Sky ATM Research</i> (дослідження КІР у єдиному Європейському повітряному просторі)
<i>STRATO</i>	<i>Stratospheric</i> (стратосферний БПЛА)
<i>UCAV</i>	<i>Unmanned Combat Air Vehicle</i> (Безпілотний бойовий ЛА)
<i>WGS</i>	<i>World geoid system</i> (глобальна система геоїду)

ВСТУП

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 безпілотних літальних апаратів (БПЛА), як цивільного так і військового застосування. Інтеграція БАС в європейську систему авіації вимагає розробки відповідних правил у областях льотної придатності, ліцензування польотного екіпажу і повітряних операцій. Це необхідні передумови вимог безпеки для внесення БАС в невідокремлений повітряний простір.

Зокрема, питаннями інтеграції БАС в Європейську систему авіації займаються EASA, Eurocontrol, SESAR JU, JARUS та Європейська комісія. Тому, наразі безпечна інтеграція БАС в європейську систему авіації є головним пріоритетом для підтримки авіаційної галузі в Європі для всього авіаційного співтовариства. Відповідно до останнього етапу плану інтеграції на період 2024-2028 очікуються польоти БАС [96] в більшості невідокремленого повітряного простору, змішані з пілотованою авіацією, дотримуючись однакових процедур організації повітряного руху (ОПР) і забезпечуючи необхідний рівень надійності та безпеки авіації. Як результат, на основі загальних правил, оператори БАС зможуть керувати польотами БПЛА транскордонно уникаючи адміністративних навантажень в отриманні спеціальних дозволів щодо плану польоту.

Потенціал України у створенні та використанні БАС також кожного року зростає. Нині наша країна фігурує як країна-виробник та споживач послуг БПЛА. Вітчизняна стратегія розвитку авіаційної промисловості приділяє особливу увагу вирішенню питань інтеграції БПЛА у Європейську систему авіації [27].

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 [96, 104].

Нажаль, пропуски в результатах вимірювань параметрів БПЛА є типовою проблемою функціонування БАС, що ставлять під загрозу вдале виконання польотного завдання [71]. Основні причини появи пропусків даних можуть бути результатом дії завод у каналі інформаційного обміну БАС та особливості функціонування датчиків і систем на борту БПЛА.

Питання відновлення даних були висвітлені у працях [15, 23, 24, 36, 45, 46, 49, 61], проте запропоновані методи не враховують специфіку безпілотної авіації та, у окремих випадках, є складними у застосуванні на борту БПЛА. Відповідно до аналізу наявних методів відновлення даних, найбільш перспективним для застосування у БАС є використання регресійного підходу з використанням сплайн-функцій за багатьма параметрами. Крім того, важливим є оцінювання похибок відновлених даних та їх вплив на подальше виконання польотного завдання.

Окрім похибок відновлення втрачених даних, на безпечний політ БПЛА впливає ряд факторів, дія яких може спричинити непередбачувані наслідки та впливати на безпеку авіації. Похибки вимірювального обладнання також спонукають до неперервного моніторингу стану БПЛА. У цивільній авіації польотні ситуації прийнято поділяти на певні класи відповідно до рівня небезпеки [48, 59]. Проте, застосування цього підходу до моніторингу польотної ситуації у БАС вимагає певних змін, що обумовлюється специфікою функціонування БПЛА.

Отже, з наведеного вище, постає актуальна, відповідно до нормативних документів, науково-практична задача розробки нового методу відновлення втрачених польотних даних БАС за багатьма польотними параметрами, що враховуватиме похибки вимірювального обладнання та забезпечить ефективне відновлення пропусків даних 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 удосконалення 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 обізнаності оператора та створює ризик невиконання польотного завдання. Застосування багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій підвищує ситуаційну обізнаність оператора БАС. Це дозволяє йому вчасно прийняти рішення щодо подальшого виконання польотного завдання та 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 англомовною складовою на безпеку аеронавігаційного обслуговування» (номер держреєстрації 0111U002325), шифр 871–ДБ13 – тема «Розробка методів та алгоритмів інтеграції датчиків навігаційної системи для управління безпілотним повітряним судном» (номер держреєстрації 0113U000090).

Мета роботи. Метою роботи є розробка методів багатопараметричного відновлення втрачених та коригування аномальних значень польотних даних 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 дисертаційної роботи полягає у вирішенні науково-практичної задачі багатопараметричного відновлення втрачених даних та багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій БПЛА.

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. Дисертаційна робота є результатом самостійних досліджень. В роботах, виконаних у співавторстві та особисто автором:

у [1, 2, 67, 84, 89, 90] – розроблено програмне забезпечення для декодування та візуалізації польотних даних БПЛА. Представлено спосіб структурування та кодування даних;

у [3] – розроблено програмний комплекс уникнення зіткнень рухомих об'єктів з перешкодами;

у [17] – виконано аналіз факторів, що впливають на функціонування безпілотних авіаційних систем;

у [18, 74] – розглянуто задачу багатоальтернативної класифікації польотної ситуації для БПЛА;

у [19] – розроблено програмне забезпечення для формування всесвітньої бази даних відомостей про аеропорти, що можуть бути використані при виконанні аеронавігаційних завдань;

у [20] – проаналізовано рівні автономності сучасних безпілотних авіаційних систем;

у [21] – описані функціональні та оперативні вимоги до наземних станцій керування. Представлено аналіз існуючих наземних станцій керування;

у [22] – проведено аналіз тенденцій розвитку безпілотних авіаційних систем. Виділені основні напрями їх технічного розвитку;

у [25, 81, 94] – розроблено програмне забезпечення для моніторингу положення ПК, за декодованою інформацією з подальшим відображенням на карті місцевості;

у [26] – розроблено спосіб позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків у повітрі, що можливо використовувати у якості резервного джерела координатної інформації на борту БПЛА;

у [44] – розроблено програмне забезпечення для декодування та візуалізації польотних даних БПЛА за повідомленнями MAVLink;

у [68] – запропоновано принцип створення траєкторії БПЛА для обльоту перешкод складної форми з її мінімальним відхиленням;

у [69] – розроблено метод багатопараметричного відновлення даних у безпілотній авіаційній системі;

у [70, 82] – виконано аналіз існуючих цифрових карт місцевості. Запропоновано методику обльоту перешкод БПЛА з використанням тривимірної цифрової карти місцевості;

у [71, 79] – виконано аналіз існуючих методів відновлення пропусків даних. Запропоновано метод відновлення втрачених польотних даних БПЛА з використанням сплайн-функції;

у [75, 83] – проведено аналіз існуючих методів усунення зіткнень БПЛА;

у [76] – виконано аналіз існуючого обладнання супутникового зв'язку для цифрового обміну даними між бортовим обладнанням та наземною станцією спостереження. Розглянуто функціональні можливості обладнання;

у [77, 85] – проведено аналіз існуючих систем управління інформацією в ОПР, представлено розроблену систему для управління метеорологічною інформацією;

у [78] – описано модифіковане програмне забезпечення для стратегічного планування та оцінювання результатів розподілу ресурсів у аеронавігаційній системі України *SPPAT (Strategic Planning and Performance Assessment Tool)*;

у [80] – проведено аналіз існуючих способів створення цифрових карт місцевості для виконання польотних завдань БПЛА;

у [92] – проведено оцінювання точності альтернативних методів позиціонування для повітряного руху;

у [93] – виконано аналіз передачі повідомлень польотної інформації через канал інформаційного обміну для завдань моніторингу повітряного руху.

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, 2015, 2013, 2011 роки), Міжнародних науково-технічних конференціях студентів та молодих вчених «Політ-2012», «Політ-2011», «Політ-2010» (м. Київ, НАУ, 2012, 2011, 2010 роки), Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та молодих учених «Проблеми навігації і управління рухом» (м. Київ, НАУ, 2011, 2010 роки), Всесвітньому конгресі «Авіація у ХХІ 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/АТМ» (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 в наукометричних базах даних, 23 тезах доповідей, патенті та 3 свідоцтвах про реєстрацію авторського права на твір.

Структура роботи. 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.

У вступі сформульовані задачі дослідження, обґрунтована актуальність та визначена мета роботи і коло розв'язуваних задач, відзначена практична спрямованість, наукова новизна, описана структура роботи і коротко викладений зміст її розділів.

У першому розділі (стор. 16 – 49) проаналізовано роль безпілотних авіаційних систем у авіації, наведено основні принципи багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій та виконано аналіз методів відновлення польотної інформації, на основі чого, сформульовані основні завдання дослідження.

В другому розділі (стор. 50 – 86) розроблено метод багатопараметричного відновлення втрачених та коригування аномальних польотних даних у безпілотній авіаційній системі, а також виведено математичну залежність для оцінювання похибки відновлення.

У третьому розділі (стор. 87 – 106) виконано адаптацію багатоальтернативної класифікації повітряних ситуацій до застосування у БАС на основі відхилень параметрів від запланованих значень з урахуванням відновлених даних, наведено порядок розрахунку метрики ситуацій та оцінювання ймовірності розпізнавання наявного класу польотної ситуації.

У четвертому розділі (стор. 107 – 140) проведено верифікацію розроблених методів багатопараметричного відновлення втрачених даних у БАС і багатоальтернативної класифікації польотної ситуації шляхом комп'ютерного моделювання та експериментальних випробувань.

У висновку (стор. 141) представлені основні результати роботи.

У додатку А наведено тексти програм на мові математичного моделювання MATLAB, що реалізують розроблені методи.

У додатку Б представлені результати декодування та візуалізації польотної інформації за результатами експериментальних випробувань.

До додатку В включені акти впровадження результатів дисертаційної роботи, патент та свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

РОЗДІЛ 1

БЕЗПЛОТНІ АВІАЦІЙНІ СИСТЕМИ

1.1 . Роль безпілотних авіаційних систем

Стрімкий розвиток авіаційних систем та комп'ютеризованих технологій наприкінці ХХ ст. створив передумови до виникнення нових принципів побудови літальних апаратів, що дозволило відмовитись від присутності пілота на борту літального апарату (ЛА). Цей надзвичайно важливий крок призвів до виникнення та швидкого поширення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) нового покоління. З іншого боку потреби сучасного світу у виконанні складних та небезпечних польотних завдань пришвидшили розвиток безпіотної авіації. Використання БПЛА є великим кроком сьогодення з революційним потенціалом у військовому застосуванні та нових цивільних завданнях. Незалежно від завдання БПЛА, їх кількість і використання стрімко зростає.

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) – це літальний апарат без присутності людини на борту з метою керування [104].

Розвиток БПЛА нерозривно пов'язаний з етапами розвитку авіації в цілому. На початку БПЛА мали суто військове застосування [56, 91], одним з основних завдань яких було ведення спостереження та розвідка. Своє застосування БПЛА знайшли під час Першої та Другої світових воєн та інших військових конфліктах до сьогодення [56]. Сьогодні інформаційні технології докорінно змінили уявлення про БПЛА та розширили сферу їх цивільного застосування від однозадачних до багатоцільових. У порівнянні з пілотованою авіацією, використання БПЛА незамінне при виконанні складних та небезпечних завдань. БПЛА використовуються для інтелектуальних завдань, розвідки, спостереження, безпеки кордонів, ідентифікації та позначення цілі, ретрансляції зв'язку, постановки радіо-завад, правоохоронної безпеки, моніторингу стану навколишнього середовища і сільського господарства, дистанційного зондування та інших завдань [91].

Значних успіхів у створенні БПЛА досягнуто завдяки підвищенню рівня їх автономності. Підвищення рівня автономності знижує рівень людських навантажень, необхідний для роботи системи та дозволяє оптимізувати роль людини у системі й створює передумови до прийняття рішення людиною там, де вони найбільш необхідні. Ці переваги підвищують ефективність трудових і економічних витрат та збільшують швидкість прийняття рішення. Рівень автономності може включати дії поза досяжністю зовнішнього керування або коли такий контроль є вкрай обмеженим (наприклад у випадку відсутності зв'язку).

Основною метою автономності є зменшення залежності БПЛА від людини оператора, але й збереження взаємодії з ним. Тобто, завданням автономності є надання можливості оператору контролювати польотне завдання, а не бути постійно залученим до пілотування БПЛА.

Виконання польотного завдання БПЛА забезпечується одним з принципів автономного керування, відповідно до яких розрізняють різні рівні автономності, що враховують взаємодію між людським контролем та рухом БПЛА.

Управління БПЛА може забезпечуватись автоматично бортовим обладнанням чи за допомогою каналу інформаційного обміну віддалено з наземної станції керування(НСК).

Розрізняють два основних типи керування БПЛА з НСК [63]:

Дистанційно пілотований БПЛА. Людина оператор виконує безперервне керування БПЛА та приймає усі рішення, щодо виконання польотного завдання. Бортові системи БПЛА безперервно фіксують дані про стан навколишнього середовища та свої характеристики, на основі яких оператор приймає рішення та виконує керування. Сигнали керування транслюються на борт БПЛА каналом інформаційного обміну (КІО). Дистанційне пілотування допускає використання часткової автоматизації складових частин системи керування з метою спрощення пілотування.

Дистанційно-керований БПЛА. Безперервне керування функціональною поведінкою БПЛА здійснюється з певного пункту керування автоматично. При цьому оператор формує польотне завдання та контролює його виконання у випадку зміни стану навколишнього середовища. Програмне забезпечення НСК дистанційно надсилає сигнали керування на борт БПЛА забезпечуючи виконання запланованого завдання. При цьому, датчики, розміщені на борту, формують дані про стан БПЛА та безперервно надсилаються до НСК, де використовуються у якості вхідних параметрів процесу керування.

У **безпілотних автоматичних літальних апаратах** керування БПЛА може виконуватись автоматично за допомогою бортової системи керування. Польотне завдання може бути закладене перед вильотом у систему керування, у вигляді траєкторії руху та командами керування з часовими обмеженнями. Система автоматичного керування під час польоту забезпечує дотримання запланованої траєкторії руху та виконання польотного завдання, керування польотом при цьому здійснюється автоматично.

Автономний БПЛА здатний контролювати та оцінювати свій польотний стан, виконувати автоматичне управління в межах свої функціональних можливостей [63]. Певні варіанти побудови БПЛА передбачають можливість зміни польотного завдання у процесі польоту. Окрім того, БПЛА високого рівня автономності здатні виконувати групові польоти та скоординовано змінювати польотне завдання у випадку дії непередбачених факторів.

Зазвичай, БПЛА є частиною системи, що забезпечує його функціонування.

Безпілотна авіаційна система (БАС) – це сукупність БПЛА з наземним пунктом дистанційного керування та персоналом, що ним керують і забезпечують його функціонування, та каналами керування і зв'язку зі споживачами результатів функціонування [43, 104]. Компоненти БАС включають в себе командування, управління, зв'язок і персонал, необхідний для управління. Типовий склад БАС містить [53]: один або декілька БПЛА; пункт наземного керування; пункт та канал зв'язку; пункт запуску і посадки; центр зберігання даних; пункт налагодження; обслуговуючий персонал.

1.1.1. Класифікація БАС

Велике різноманіття принципів побудови БАС та їх функціональних характеристик потребує застосування різних підходів до класифікації. Різні автори [16, 43, 58, 101] пропонують певні критерії класифікації БАС, такі як максимальна злітна маса, розмір, умови експлуатації, здатність функціонування та інші характеристики БПЛА.

Класифікація заснована на впливі ризику зіткнення з земною поверхнею, у якості основного критерію використовує максимальну злітну масу БПЛА. Відповідно до цього виділяють чотири класи за критеріями максимальної злітної маси (табл.1.1.). Максимальна злітна маса є підходящим критерієм для класифікації літаків, оскільки він добре корелює з очікуваною кінетичною енергією, що виникає при зіткненні, яка, вважається основним фактором, що впливає на ймовірність руйнувань конструкції БПЛА [58].

Класифікація БПЛА за висотою польоту дозволяє висунути вимоги до ступеня уникнення зіткнення. За класифікацією на основі ризику зіткнення в повітрі, виділяють наступні висотні рівні польоту [58]: мала висота (польоти в класі G повітряного простору на висотах менше 122 – 152м); середня висота (польоти в класі А через повітряний простір класу Е); велика висота (польоти в класі Е вище FL600).

Таблиця 1.1 – Класифікація БПЛА за ризиком зіткнення з земною поверхнею

Клас БПЛА	Максимальна злітна маса, кг	Висота польоту	Швидкість
I Клас	до 9	< 365м AGL	< 51м/с
II Клас	від 9 до 25	< 1067м AGL	< 128 м/с
III Клас	від 25 до 600	< 5486 м MSL	< 128 м/с
IV Клас	понад 600	> 5486 м MSL	будь-яка

У залежності від типу польотного завдання та функціональних можливостей БПЛА [43], можна представити загальну класифікацію наведену у табл.1.2.

Таблиця 1.2 – Загальна класифікація БПЛА

Категорія БПЛА	Позначення	Дальність, км	Висота польоту, м	Ресурс, год	Вага, кг
Тактичні БПС					
Нано	Nano	< 1	100	< 1	< 0,025
Мікро	Micro	< 10	250	1	< 5
Міні	Mini	< 10	150 – 300	< 2	< 20 (150)
Ближня дальність	CR	1030	3000	24	25-150
Мала дальність	SR	3070	3000	36	50-250
Середня дальність	MR	70200	5000	610	150-500
Середня дальність, тривалий політ	MRE	> 500	8000	1018	500-1500
Велика дальність на малій висоті	LADP	> 250	9000	0,51	250-2500
Тривалий політ на малій висоті	LALE	> 500	3000	> 24	150-250
Тривалий середньовисотний політ	MALE	> 500	8000	2448	1000-1500
Стратегічні БПЛА					
Дальність польоту на великій висоті	HALE	> 2000	20000	2448	2500-5000
БПС спеціального використання					
Безпілотні бойові	UCAV	≈1500	12000	≈ 2	>1000
Ударні	LET	300	4000	34	не визначена
Пастки	DEC	0 – 500	5000	< 4	150-500
Стратосферні	STRATO	> 2000	20000 – 30000	> 48	>2500
Надстратосферні	EXO	не визначена	>30500	не визначений	не визначена

Інший спосіб класифікації БАС, ґрунтується на рівнях автономності, відповідно до якого для визначення автономності використовують рівні автономного контролю. Найбільш загальним є поділ на десять рівнів на основі вимог до ситуаційної обізнаності, аналізу ситуації, координації, прийняття рішень і функціональних можливостей[54]:

- Рівень 0. БПЛА пілотується дистанційно;
- Рівень 1. БПЛА виконує заплановане завдання;
- Рівень 2. Передбачається зміна польотного завдання;

- Рівень 3. Швидка реакція на зміну навколишнього середовища у режимі реального часу;
- Рівень 4. БПЛА адаптований до змін навколишнього середовища;
- Рівень 5. Координація групових польотів;
- Рівень 6. Кооперація групових польотів;
- Рівень 7. Виявлення динамічної інформації стосовно польотного завдання;
- Рівень 8. Використання динамічної інформації для виконання місії;
- Рівень 9. Оптимальне виконання місії відповідно до динамічних умов;
- Рівень 10. БПЛА повністю автономний.

1.1.2. Застосування БАС

Розвиток суспільства потребує застосування БАС для вирішення широкого кола завдань різного рівня складності, що потребує вдосконалення та створення нових БПЛА. Сьогодні БАС є надзвичайно актуальними, їм доручають виконання надважливих завдань, пов'язаних з безпекою та життям людини. Їх застосовують для вирішення як локальних завдань так і на національному рівні. Окрім того, БАС задіяні у ряді проектів з моніторингу стану навколишнього середовища та вирішенні глобальних проблем людства [53, 55, 63].

БАС є незамінними у вирішенні ряду цивільних завдань, таких як пошук, виявлення та ідентифікації об'єктів, а також точне визначення їх координат; моніторинг та боротьба зі стихійними лихами; спостереження за нафто- та газопроводами, електромережами; виявлення пожеж; пошук і порятунк; прикордонне патрулювання; виконання правоохоронних завдань; спостереження громадських заходів; охорона важливих об'єктів; спостереження наземного і морського руху; екологічний контроль та моніторинг (в тому числі повітряне і морське забруднення) [55]; телекомунікації; моніторинг рослинництва; спостереження за тваринами; розвідка корисних копалин; наземне відображення і фотографування; метеорологічне спостереження; перевезення вантажу; аерофотозйомка; моніторинг та контроль дорожнього руху; ведення географічних, геологічних та археологічних досліджень [63].

БАС є незамінними при виконанні завдань військового спрямування, зокрема: стеження ворожих флотів; розміщення і моніторинг гідроакустичних буїв; ведення розвідки; моніторинг ядерного, біологічного чи хімічного забруднення; моніторинг та слідування цілі; розміщення та знищення наземних мін; постановка радіозад [91].

У відповідності до специфіки польотного завдання, певні з них не можуть бути вирішені з застосуванням пілотованої авіації, такі як багатогодинний нагляд за певною територією, оскільки може привести до втрати концентрації уваги пілота і, як результат, до зниження ефективності виконання місії. БПЛА, з групою різноманітних сенсорів для спостереження на борту є більш ефективним та економічним в експлуатації.

У випадку застосування БПЛА для моніторингу навколишнього середовища при радіаційному або хімічному забрудненні, екіпаж не потрапляє під загрозу. При цьому, дезінфікація БПЛА є простішою у порівнянні з пілотованим ЛА.

БПЛА успішно виконує польотні завдання у сільському господарстві, що стосуються розпилення токсичних чи хімічних речовин.

При військовому застосуванні для ведення розвідки БПЛА має значні переваги завдяки малим розмірам та малій відбиваючій поверхні, що ускладнює його виявлення та знешкодження. Оператори БПЛА не мають прямої загрози для власного життя, що дозволяє зосередитись на керуванні та ефективно виконувати польотне завдання.

Моніторинг ліній електропередач та контроль лісових пожеж є яскравими прикладами цивільного застосування БПЛА, адже при цьому мінімізується ризик для персоналу.

БПЛА є незамінним у моніторингу складних метеорологічних умов таких як дослідження торнадо та смерчів.

Застосування БПЛА спричинює менший вплив на навколишнє середовище у порівнянні з пілотованим повітряним судном. Оскільки, як правило, мають

менші розміри, масу та споживають менше енергії, тому виробляють більш низькі рівні викидів та шуму.

1.2. Архітектура БАС

1.2.1. Структура БАС

Відповідно до складності польотного завдання БАС мають різну структуру побудови. У найпростішому випадку БАС може складатися з базової станції керування (БСК) та БПЛА. Проте типова БАС, орієнтована на виконання більш складних польотних завдань, складається з великої кількості структурних елементів поєднаних між собою складними взаємозв'язками [63]. Узагальнена схема взаємодії структурних елементів БАС представлена на рис. 1.1.

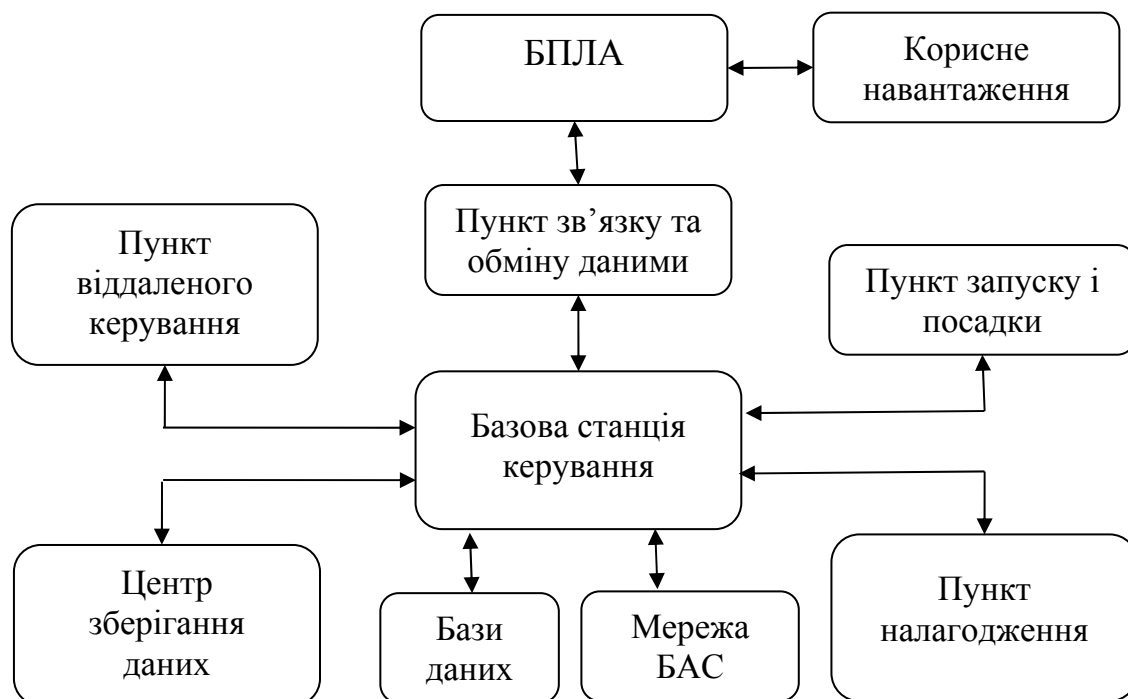


Рис. 1.1. Узагальнена схема взаємодії структурних елементів БАС

Центральним елементом керування БАС є БСК, що забезпечує функції керування БПЛА та взаємодії з корисним навантаженням для оператора. У залежності від складності польотного завдання, розрізняють різні габаритні розміри БСК від малих до великих, що можуть складатися з декількох робочих станцій. БСК не завжди розміщуються на земній поверхні, окрім них виділяють бортові морські та авіаційні пункти. До складу БСК зазвичай належать

оператор пілотування БПЛА, що забезпечує рух за заданою траєкторією та оператор взаємодії з даними корисного навантаження БПЛА.

Планування польотного завдання не обов'язково відбувається у БСК. Іноді залучається віддалений центр планування, що зв'язується з БСК цифровою мережею передачі даних. План польотного завдання закладається оператором у БПЛА через КІО або безпосередньо перед польотом у внутрішню пам'ять БПЛА. Під час польоту БПЛА транслює інформацію про стан підсистем та своє місцезнаходження разом з даними корисного навантаження через КІО. Для ефективного виконання польотного завдання БСК використовує дані від джерел надання інформаційних послуг (метеорологічні дані, сонячна активність та інші). У разі планування складних завдань, БСК можуть об'єднуватись в мережі та діяти скоординовано для гарантування виконання польотного завдання.

Складність та характер польотного завдання визначають тип БПЛА, що використовується для його виконання. У загальному випадку, БПЛА містить необхідні системи для забезпечення польоту, що включають стабілізацію та керування БПЛА у повітрі, КІО з БСК, джерело електроживлення чи паливо та навігаційні системи [53].

Основною задачею БПЛА є транспортування корисного навантаження за певною траєкторією руху. Отримання даних від корисного навантаження є польотним завданням у більшості випадків, що може бути пов'язане із спостереженням, транспортуванням, зв'язком, зондуванням, розвідкою. Тип та клас БПЛА часто обирається від запланованого набору корисного навантаження у БАС. Розмір і вага корисного навантаження є одним з найвагоміших критеріїв при проектуванні. Розміщення корисного навантаження на борту залежить від фізичних принципів побудови обладнання спостереження. Зокрема можуть використовуватись електронно-оптичні чи інфрачервоні камери, радіолокаційні станції чи далекомірні системи.

Польотне завдання визначає склад корисного навантаження, що може змінюватись від відносно простих підсистем, що складаються з нестабілізованої відеокамери з фіксованою лінзою; відеосистеми з значною

дальністю дії з автоматичним об'єктивом гіростабілізованим на спеціалізованій платформі до повнофункціональних радіолокаційних станцій високої потужності значної маси. Більш складні БПЛА використовують комбінацію різних типів датчиків, інтегруючи їх дані для підвищення їх точності. Так зображення з оптичного сенсору чи теплової знімальної камери доцільно об'єднувати з далекомірним обладнанням (лазерним, акустичним чи радіолокаційним). Це дозволяє отримувати повну інформацію стосовно об'єкта спостереження.

Пункт запуску є необхідним для БПЛА, що не мають здатності вертикального зльоту та обмежені у доступі до злітно-посадкової смуги необхідної поверхні та довжини. Пункт запуску може використовувати різні фізичні принципи збільшення підйомної сили БПЛА. У найпростішому випадку може використовуватись похила поверхня з рухомою платформою, що прискорюється.

Пункт налагодження обладнання БПЛА як правило, є необхідним у разі використання складного обладнання корисного навантаження та важких БПЛА. У разі використання легких ЛА пункт налагодження виконує функції відновлення конструкції БПЛА зіпсованих під час польоту.

Пункт зв'язку забезпечує постійний КІО між БПЛА та БСК.

Найбільш важливим елементом функціонування БАС є оператор. Його професійні навички та компетентність є запорукою ефективного виконання польотного завдання.

1.2.2. Обладнання безпілотного літального апарату

Бортове електронне обладнання БПЛА забезпечує функціонування та виконання польотного завдання. Склад авіоніки залежить від класу БПЛА та його функціонального призначення. Проте, основним завданням авіоніки БПЛА є забезпечення виконання польотного завдання, що включає керування БПЛА за заданою траєкторією руху. Виконання польотів у середовищі з динамічно змінюваними параметрами потребує ситуаційної обізнаності у режимі реального часу, що забезпечується різноманітними сенсорними технологіями.

Окрім того, алгоритми керування БПЛА повинні враховувати зміни навколишнього середовища з метою точного виконання польотного завдання. Відповідно до цього, повинно забезпечуватись функціонування у погіршених та складних метеорологічних умовах, враховуватись рельєф місцевості та інші перешкоди на траєкторії руху БПЛА, спостереження за навколишніми рухомими об'єктами, що можуть становити загрозу руху. Системи авіоніки повинні функціонувати у середовищі з наявними радіозавадами.

Бортове обладнання БПЛА повинне виконувати більшість задач авіоніки типового літака пілотованої авіації, а також забезпечувати вирішення певних задач відповідно до рівня автономності.

Виконання вимог поставлених до сучасного БПЛА забезпечується використанням інформаційних та обчислювальних технологій у структурі авіоніки. За своєю архітектурою більшість БПЛА цивільного призначення містять обчислювач, що за інформацією від інших джерел даних забезпечує функції керування та навігації. Застосування сучасних цифрових технологій дозволило поступово перейти від системної архітектури до програмної, як результат це дозволило значно зменшити кількість обладнання авіоніки та мінімізувати габаритні розміри БПЛА.

Відповідно до класу БПЛА та призначення, різні нормативні документи висувають певні вимоги до складу авіоніки. Так, наприклад стандарти STANAG стосуються авіоніки БПЛА військового призначення [66], EASA та JARUS – цивільного.

У загальному випадку бортове обладнання БПЛА складається з систем позиціонування, обчислювача польотної інформації, різноманітних датчиків, засобів керування рульовими поверхнями та силовою установкою, обладнання корисного навантаження та каналу інформаційного обміну (рис. 1.2).

Система позиціонування призначена для визначення власного місцеположення у певній системі координат в будь-який момент часу. Координати місцеположення БПЛА відіграють ключову роль у вирішенні задач переміщення у просторі. Відповідно до цього, системі позиціонування

висуваються жорсткі вимоги до точності визначення координат. Основними системами позиціонування у просторі є глобальна навігаційна супутникова система (GNSS) з використанням різних функціональних доповнень та інерціальна навігаційна система [62]. Переважна більшість систем позиціонування, крім координат власного місцеположення, забезпечують розрахунок похідних даних таких як висота польоту, лінійні швидкості польоту, кутова орієнтація та інші.

Функціонування БАС забезпечується шляхом вимірювання та контролю параметрів системи. Основним джерелом інформації про стан БПЛА та БАС у цілому є різноманітні датчики, що безперервно контролюють вимірювальні параметри.

Датчик – це пристрій, що перетворює вхідний вплив будь-якої фізичної величини в сигнал, зручний для подальшого використання. Основними датчиками БПЛА є гіроскопи, акселерометри, датчики тиску, датчики магнітного поля, пірометричні прилади, температури, кутів атаки та ковзання, напруги живлення [28, 42].

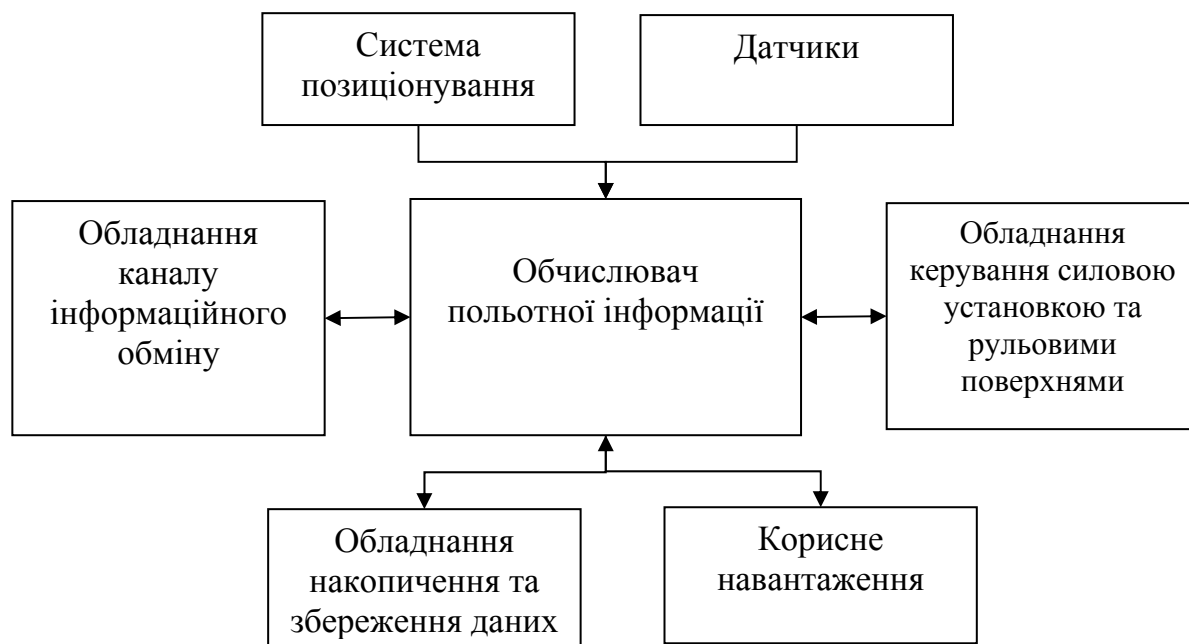


Рис. 1.2. Узагальнена структура бортового обладнання БПЛА

Корисне навантаження БПЛА може включати відеокамери, обладнання денної і нічної розвідки, РЛС, оптико-електронні, метеорологічні, хіміо-біологічні прилади, обладнання зв'язку та навігації, будь-яке обладнання, необхідне для виконання польотних завдань БПЛА. Обчислювач польотної інформації використовується для управління БПЛА.

Канал інформаційного обміну між БПЛА та БСК забезпечується трьома важливими функціями: висхідна лінія зв'язку від наземної станції для передачі керуючих даних до БПЛА; низхідна лінія зв'язку від БПЛА для передачі даних від бортових датчиків і обчислювальної системи на наземну станцію; засоби для забезпечення виміру азимута і дальності від наземної станції до БПЛА для забезпечення зв'язку між ними. Основним завданням обладнання зв'язку є гнучкість, адаптивність та безпека інформаційних потоків даних.

Для забезпечення цілісності систем БПЛА, необхідно проводити постійний моніторинг їх справностей. Це гарантує, що непомічені несправності в системі не призведуть до катастрофічної відмови систем БПЛА, що можуть зашкодити виконанню польотного завдання.

Система БПЛА повинна мати можливість планувати і перепланувати власну траєкторію польоту з урахуванням зміни стану навколишнього середовища. Операція планування польотів вимагає знання оточення БПЛА; в тому числі повітряного простору, рельєфу, іншого руху, метеорологічних умов, зони обмежень і перешкод.

БПЛА повинен мати записи даних про причини втрати зв'язку. Стратегічне бачення передбачає, що в тому випадку, якщо зв'язок між БСК та БПЛА були повністю розірвані, БПЛА повинен бути попередньо запрограмований спробувати протягом деякого часу відновити зв'язок задля виконання повністю автоматизованої програми повернення до НСК або самостійного завершення польотного завдання.

1.2.3. Тенденції розвитку

Стрімкий безперервний розвиток технологій створює передумови до вдосконалення базової структури БАС та його обладнання. Підвищення

функціональних можливостей БАС щодо виконання польотного завдання та зниження ризику для людського життя є основною передумовою, що рухає розвиток безпілотної авіації. Основними напрямками розвитку БАС є: зменшення ваги БПЛА (завдяки широкому застосуванню композитних матеріалів), збільшення часу функціонування БПЛА без посадки, збільшення ваги корисного навантаження та широке використання стандартних взаємозамінних модулів. Подальша мікромініатюризація БПЛА, більша сумісність датчиків та інтеграція інфраструктури призведе до появи менших за розмірами та більш витривалих БПЛА. Як результат, більші можливості з меншими затратами стануть передумовами до розширення сфер застосування безпілотної авіації.

Відповідно до прогнозу міністерства оборони США відсоток БПЛА військового призначення зростає з 25% у загальному обсязі сьогодні до 70% повітряного флоту до 2035 (рис. 1.3) [103].

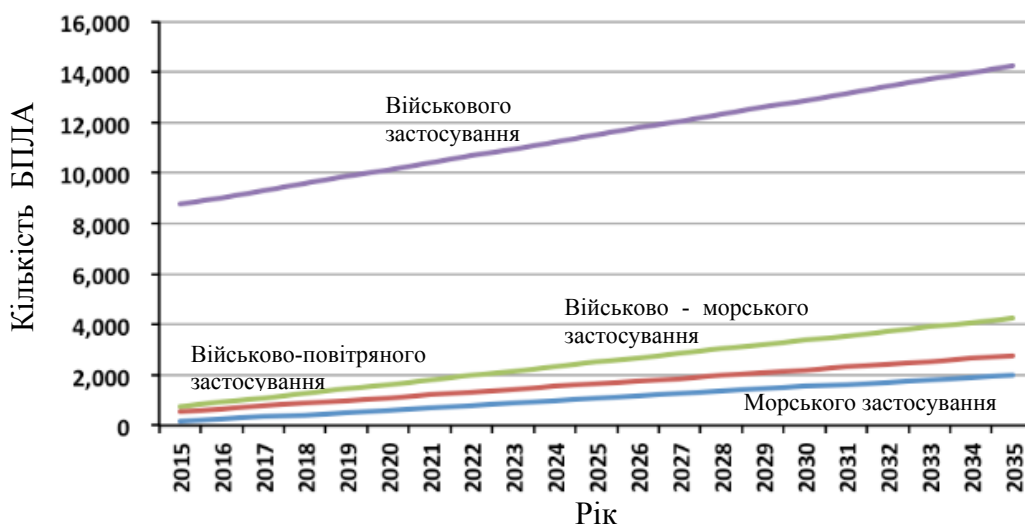


Рис. 1.3. Прогнозована кількість БПЛА військового застосування

Прогнозується, що у 2022 – 2023рр. розпочнеться період значних комерційних продажів БПЛА, їх продуктів та послуг. У наступні роки передбачається стрімке зростання попиту на БПЛА до 250 тис одиниць до 2035, з яких 175 тис будуть мати комерційне призначення (рис. 1.4) [103].

Очікується, що застосування БАС перевищать пілотовані польоти повітряних суден, як під час військових так і цивільних завдань до 2035 року.

Технології, необхідні для забезпечення такого зростання стрімко розвиваються, витрати скорочуються, і використання зростає.

Потреби сучасного суспільства висувають певні вимоги до функціонування БАС. Зокрема, вони повинні мати здатність забезпечувати більш ефективно функціонування за рахунок використання сумісного обладнання, більшої автоматизації та продуктивності [105], будуть витривалими до будь-якого впливу навколишнього середовища, матимуть надійний захист від несанкціонованого доступу, зі скороченням чисельності персоналу для експлуатації та обслуговування системи.

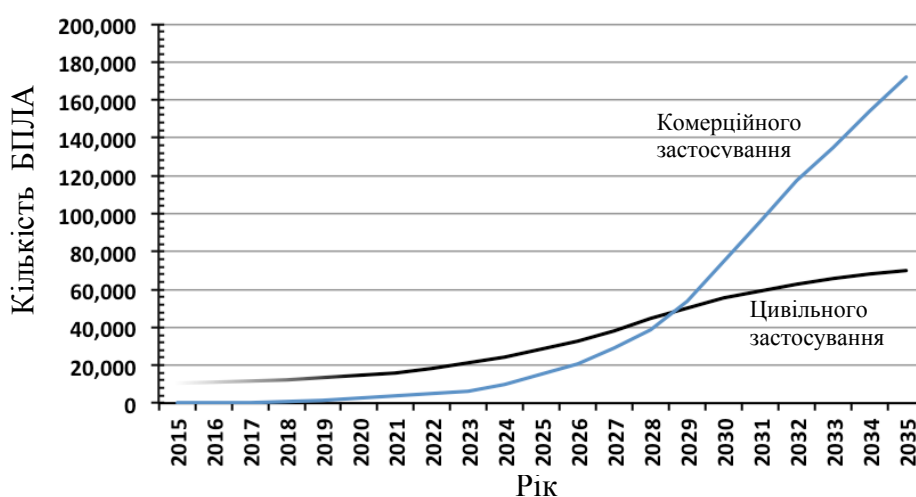


Рис. 1.4. Тенденції розвитку БПЛА

Ключовим елементом розвитку ринку БАС є покращення засобів навігації та застосування інтегрованих технологій, що спонукають до їх широкого використання, визначають нові завдання та відкривають нові ринки. Це, в свою чергу змушує вдосконалювати технологічні можливості з більш низькими витрати та розширеними можливостями.

Доцільно виділити шість основних напрямків технічного розвитку БАС, що відображають стратегічні пріоритети та у поєднанні зі скороченням експлуатаційних витрат відіграють важливу роль у потребах безпілотної авіації:

1) Реалізація інноваційних, недорогих виробничих процесів матиме ключове значення для розвитку конструкції БАС.

2) Основним напрямом розвитку силової установки БПЛА є зменшення витрати палива чи зниження електроспоживання для електромоторних БПЛА.

3) Поліпшення КІО. Ефективність виконання польотного завдання значно залежить від доступності, швидкості та захищеності КІО від дії завад.

4) Сучасний розвиток технологій мікро-мініатюризації датчиків, що постійно продовжує вдосконалення мікро-електромеханічних пристроїв (MEMS) та інтегрованих комп'ютерних чіпів (ASIC) призведуть до збільшення інформаційних характеристик даних, датчики будуть функціонально інтегровані в декілька джерел даних та продовження зменшення габаритних розмірів та ваги.

5) Інформаційні системи постійно збільшуються в складності функціонування, що зумовлюється необхідністю роботи з великими обсягами даних та багатьма користувачами.

6) Розвиток систем корисного навантаження. Основним завданням є підвищення точності та роздільної здатності систем дистанційного спостереження з використанням нових принципів побудови.

Сучасні тенденції розвитку передбачають підвищення рівня автономності БПЛА та повну заміну оператора пілотування на оператора планування польотного завдання. Особливо актуальною автономна робота є у разі виконання групових завдань, що потребує скоординованої дії різних БПЛА для прийняття спільного рішення. Стрімкий розвиток авіаційної системи висуває нові вимоги до функціонування БАС особливо в умовах переходу до польотів БПЛА у контрольованому повітряному просторі [73].

1.3. Необхідність класифікації польотних ситуацій

1.3.1. Фактори, які впливають на функціонування БАС

На нормальний хід польоту БПЛА впливає цілий спектр факторів, що спричиняють відхилення деяких параметрів руху від оптимальних значень.

Функціонування БАС безперечно пов'язане з забезпеченням певного рівня безпеки польотів. Безпечність виконання польотного завдання залежить від широкого спектру факторів, що відображають можливі небезпеки.

Фактор це певна дія, подія або умова, наявність якої впливає на вдаль виконання польоту. Фактор безпосередньо впливає на виникнення небезпечної ситуації [28].

Питання врахування дії небезпечних факторів, що можуть виникнути від час функціонування БАС, є одними з найактуальніших під час проектування та обслуговування БАС. Оцінювання дії факторів на безпеку польотів виконується за допомогою ризиків.

Ризик – це ймовірність виникнення небажаного результату. Для безпеки польотів ризик розглядається як оцінка наслідків дії небезпеки у вигляді прогнозованої ймовірності або серйозності [28, 99].

Розробники, оператори та обслуговуючий персонал безперервно працюють над виявленням та зменшенням ризиків під час експлуатації БАС.

Виявлення факторів небезпеки і управління факторами ризику для безпеки польотів є основними процесами управління безпекою польотів. Фактори небезпеки – це потенційні вразливі місця, притаманні соціально-технічним виробничим системам [99].

У багатьох випадках виникнення ризиків починається з відхилення БПЛА, через дію небезпечних факторів, від запланованої траєкторії руху.

Небезпека визначається як стан або предмет, що може завдати травми персоналу, шкоди обладнанню або конструкціям, спричинити знищення матеріалів або знизити здатність здійснювати вказану функцію [99].

Аналіз ризиків БАС вказує на велику кількість факторів однакових з пілотованою авіацією, пов'язаних з конструкцією, керованістю, силовою установкою та бортовими системами. БАС у понятті безпеки повітряного руху є більш складним у порівнянні з пілотованою авіацією, оскільки окрім загальних небезпек функціонування, БАС пов'язане з специфічними факторами, адже

багато функцій управління польотом, критичних для БАС, розташовуються в наземному пункті управління, а не на борту БПЛА.

Іншими питаннями безпеки польоту є поєднання управління польотом та контролю обладнання корисного навантаження. Небезпеки, пов'язані з використанням корисного навантаження для виконання польотного завдання не обов'язково знаходяться на тому ж рівні критичності як і управління БПЛА. Зменшення небезпек досягається шляхом спільного використання ресурсів для взаємодії між корисним навантаженням та БПЛА.

З іншої точки зору безпека руху забезпечується шляхом компромісу між ручним управлінням та автономними операціями. У пілотованій авіації, пілот завжди відповідає за моніторинг автономного функціонування систем літака та може втрутитися у будь-який момент часу для виключення дії більшості небезпечних факторів. Втрата КІО виключає можливість втручання оператора в управління БПЛА та створює передумови до посилення дії небезпечних факторів, що у майбутньому можуть поставити вдале виконання польотного завдання під загрозу.

Загалом фактори, що впливають на нормальний перебіг польоту БПЛА можна розділити на три основні зони їх дії: конструкція БАС; людський чинник; функціонування БАС [65]. Кожна з цих зон дії має певні унікальні фактори, проте, з часом дія цих факторів розповсюджується на всі інші зони.

Основними небезпечними умовами, які можуть привести до втрати управління БПЛА є [95]:

- втрата тяги (відмова двигуна, відсутність палива, обледеніння, погані метеоумови);
- втрата підйомної сили (пошкодження конструкції БПЛА, погані метеоумови);
- втрата інформації про місцезположення БПЛА (відмова навігаційної системи);

- незапланована відмова КІО (політ поза зоною дії КІО, затуляння антенної системи частинами конструкції БПЛА, втрата сигналу НСК, дія радіозавад, ненавмисне відключення автопілота);

- втрата органів керування польоту (проблеми сервоприводів, відмова автопілота, обледеніння);

- втрата джерела живлення (відмова генератора, відмова резервної батареї, надмірне навантаження);

- втрата НСК (втрата живлення, відмова обладнання, людський фактор).

Небезпечними умовами і причинами, пов'язаних з зіткненням в повітрі з іншим повітряними суднами є [95]:

- навігаційні помилки (збій системи навігації, похибки системи позиціонування, неточність цифрової карти місцевості);

- помилки визначення висоти (неправильне налаштування барометра, недостатнє оповіщення під час відхилення висоти);

- неможливість виявлення та уникнення зіткнень (обмежені можливості, автономна робота);

- помилки планування польотного завдання (випадкове відхилення у захисні межі іншого літака чи БПЛА);

- відмова ідентифікації БПЛА (відмова літакового відповідача, втрата лінії зв'язку між оператором БПЛА та КІО).

Фактори, втрата яких може привести до втрати БПЛА [95]:

- неадекватна реакція оператора (непрофесіоналізм, відсутність чи помилковість, або неоднозначність польотної інформації, затримки в КІО);

- неправильне встановлення критичних параметрів польоту (помилки введення оператором);

- перевантаження оператора (велика кількість задач протягом короткого проміжку часу);

- затримка команд управління польотом (оператор віддалений від контуру управління БПЛА, недетерміноване програмне забезпечення, довгий КІО);

- втома оператора;

- управління груповими польотами БПЛА;
- незахищеність програмного забезпечення (несподіване перезавантаження, недостатня безпека програмного забезпечення).

1.3.2. Принципи множинної класифікації ситуацій

Безпечне виконання польотного завдання великою мірою залежить від наявності, часу дії та кількості негативних факторів. У випадку, якщо дія негативних факторів відсутня чи така, що результат їхньої дії не порушує безпеки виконання польотного завдання, тоді можна вважати, що такі вимоги відповідають нормальним умовам польоту. Нормальні умови польоту є запорукою вдалого виконання польотного завдання БАС.

Проте, у дійсності під час польоту БПЛА діє у реальному повітряному просторі, взаємодіє з технічними системами та є вразливий до дії людського чинника. Все це створює передумови для виникнення цілого спектру факторів, що негативно відбивається на безпеці повітряного руху та може стати причиною виникнення особливої ситуації польоту. Особлива ситуація є результатом дії небезпечних факторів та відображає значний вплив на безпеку руху [48]. Після аналізу небезпечних факторів виконується оцінювання ймовірності їх виникнення. Завдяки такому аналізу виконується розгрупування небезпечних факторів за рівнем їх впливу та виділяються найвагомші з них. Фактори, що характеризуються низьким ризиком можна не враховувати у випадку, якщо їх усунення переважає матеріальні витрати.

Процес контролю факторів ризику для безпеки польотів, пов'язаний з наслідками факторів небезпеки, починається з оцінки ймовірності того, що наслідки факторів небезпеки матеріалізуються в ході діяльності, тобто з оцінки ймовірності факторів ризику для безпеки польотів. Ймовірність факторів ризику для безпеки польотів визначається як можливість виникнення небезпечної події або стану.

Невід'ємною частиною контролю факторів ризику для безпеки польотів є оцінювання серйозності наслідків небезпеки, якщо її потенціал заподіювати шкоду матеріалізується в ході діяльності БАС. Серйозність факторів ризику для

безпеки польотів визначається як можливі наслідки небезпечної події або стану, при цьому за контрольний орієнтир приймається найгірша передбачуваних ситуація.

За ступенем серйозності особливі ситуації поділяються на ускладнення умов польоту, складну, аварійну та катастрофічну ситуації [28; 48, стор. 115; 97; 98]. Проте, визначення класів ситуацій є різним для літаків, БПЛА цивільного та військового призначення:

1) Ускладнення умов польоту (УУП)

Для цивільних літаків УУП характеризується незначним збільшенням психофізіологічного навантаження на екіпаж або незначним погіршенням стійкості й керованості чи льотних характеристик ПК. УУП не призводить до необхідності негайної або непередбачуваної зміни плану польоту і не створює перешкод щодо його продовження, за винятком випадків, зазначених у керівництвах з льотної експлуатації [48].

Для БПЛА УУП характеризується небезпечними умовами, що не знижують рівень безпеки польоту значною мірою, причому оператор БПЛА в змозі усунути наслідки їх дії. Дозволяється незначне зниження безпеки або певних функціональних можливостей та невелике збільшення робочого навантаження на оператора [64]. Характеризується мізерними відхиленнями від вимог виконання польотного завдання, незначними професійними захворюваннями або дрібними пошкодженнями системи [51].

2) Складна ситуація (СС)

Для цивільних літаків СС характеризується значним підвищенням психофізіологічного навантаження на екіпаж або значним погіршенням стійкості й керованості ПК чи його льотних характеристик. Це також випадок, коли один або декілька параметрів польоту виходять за експлуатаційні обмеження, але без досягнення їх граничних обмежень та розрахункових умов. Для запобігання переходу СС в АС або КС необхідними є своєчасні й правильні дії членів екіпажу, в тому числі стосовно негайної зміни плану, профілю чи режиму польоту [48].

Для БПЛА цивільного призначення СС характеризується небезпечними умовами, що призводять до зменшення функціональних можливостей БАС або здатності оператора усунути несприятливі умови функціонування, що призводить до значного зниження рівня безпеки. Характеризується значним збільшенням навантаження на оператора або умовами, що можуть знизити ефективність дій оператора з потенційно можливою шкодою для людини [64]. Характеризується незначними відхиленнями від вимог виконання польотного завдання, травмами, незначними професійними захворюваннями або незначними пошкодженнями системи [51].

Для БПЛА військового призначення СС характеризується небезпечними умовами, які або самотійно, або в сукупності зі збільшенням навантаження на оператора, призведуть до вимушеної посадки БПЛА, під час якої не очікується значних пошкоджень його конструкції, або небезпечними умовами, що потенційно можуть призвести до ушкодження оператора БПЛА чи наземного персоналу [66].

3) Аварійна ситуація (АС)

Для цивільних літаків АС характеризується значним підвищенням психофізіологічного навантаження на екіпаж, погіршенням льотних характеристик, стійкості й керованості ПК та призводить до досягнення (перевищення) граничних обмежень і розрахункових умов. Запобігання переходу АС в КС потребує високої професійної майстерності членів екіпажу [48].

Для БПЛА цивільного призначення АС характеризується небезпечними умовами, що стануть причиною зменшення функціональних можливостей систем БПЛА або можливостей оператора усунути несприятливі умови функціонування, до складу яких відноситься: значне зниження рівня безпеки; фізична неспроможність або завелике навантаження за якого оператор БПЛА не в змозі гарантувати точне виконання польотного завдання; фізична нездатність осіб, включаючи травми [64]. Характеризується значними відхиленнями від

вимог виконання польотного завдання, тяжкими травмами, професійними захворюваннями або значними пошкодженнями системи [51].

Для БПЛА військового призначення АС характеризується небезпечними умовами, що самотійно або у поєднанні зі збільшенням навантаження на оператора, призведуть до припинення польоту або стануть причиною вимушеної посадки, що може призвести до втрати БПЛА, проте без людських жертв; або небезпечними умовами, що потенційно могли б привести до серйозних травм оператора або наземного персоналу [66].

4) Катастрофічна ситуація (КС)

Для цивільних літаків КС – це стан, за якого запобігти загибелі людей практично неможливо у поєднанні з втратою літака [48].

Для БПЛА цивільного призначення КС характеризується небезпечними умовами, що призводять до повної втрати здатності контролю траєкторії польоту БПЛА, що призведе до його руйнування або заподіє серйозних травм людині [64]. Характеризується повним провалом польотного завдання, людськими жертвами або втратою системи [51].

Для БПЛА військового призначення КС характеризується небезпечними умовами, що призводять до неконтрольованого польоту (у тому числі політ за межами запланованої траєкторії руху) та як результат неконтрольованої катастрофи, що може привести до людських втрат; або небезпечними умовами, які могли б потенційно привести до загибелі оператора БПЛА або наземного персоналу [66].

1.4. Відновлення польотної інформації

1.4.1. Підходи до аналізу польотної інформації

Функціонування БАС пов'язане з керуванням та обробкою складних інформаційних потоків даних. Для аналізу польотної інформації застосовують класичні статистичні методи, такі як дисперсійний, регресійний, кореляційний та коваріаційний аналізи.

Дисперсійний аналіз польотних даних необхідний для аналізу мінливості ознаки під впливом будь-яких контрольованих змінних факторів, тобто досліджує вплив кількох якісних змінних на одну залежну кількісну змінну. Іншими словами метою дисперсійного аналізу є розщеплення сумарної дисперсії досліджуваної величини на окремі складові: дисперсію, обумовлену дією одного або декількох параметрів, що змінюють своє значення від об'єкта до об'єкта, і дисперсію, викликану сумісною дією всіх інших факторів, що не враховуються. Для проведення дисперсійного аналізу необхідні дані трьох і більше вибірок, і слід застосовувати тільки тоді, коли доведено, що розподіл є нормальним [5, 46].

Регресійний аналіз використовується для дослідження впливу однієї або декількох незалежних змінних на залежну. Термінологія залежних і незалежних змінних відображає лише математичну залежність змінних, а не причинно-наслідкові відносини, так само регресійний аналіз не можна використовувати для визначення наявності зв'язків між змінними, оскільки наявність такого зв'язку і є передумовою застосування аналізу. Таким чином, за допомогою регресійного аналізу досліджується форма зв'язку між досліджуваними змінними та визначається її вид [9, 12, 14, 32, 38].

Кореляційний аналіз використовується для виявлення взаємозв'язків між випадковими параметрами, тобто отримання деякої інформації однієї змінної за допомогою іншої, що дозволяє розглянути структурний взаємозв'язок, а також допомагає підібрати набір незалежних параметрів [14, 38].

Коваріаційний аналіз відноситься до аналізу моделі залежності середнього значення деякої випадкової величини одночасно від набору якісних і кількісних факторів. Такий аналіз часто застосовують перед дисперсійним аналізом для перевірки однорідності вибірки спостережень за кількісними факторами. У зв'язку з певними обмеженнями стосовно точності, у загальному випадку для аналізу багатовимірних даних найчастіше використовується метод головних компонент [4] або факторний аналіз [39], що відповідно ґрунтуються на коваріаційних і кореляційних даних [14].

1.4.2. Природа пропусків даних

Оцінювання пропущених значень потребує розуміння їх природи. Розрізняють три основних види механізмів формування пропусків:

- повністю випадкові (missing completely at random, MCAR);
- випадкові (missing at random, MAR) ;
- не випадкові (missing not at random, MNAR).

Для MCAR характерна незалежність змінної з пропусками від власних і будь-яких інших аналізованих значень.

MAR передбачає залежність змінної з пропусками від інших змінних в наборі даних.

MNAR має місце, коли пропущені змінні залежать від своїх же значень.

Можливість використання методів різного ступеня складності пов'язана з тим, наскільки простим або складним є механізм, згідно з яким дані виявляються пропущеними.

1.4.3. Класифікація методів відновлення даних

Різні автори по різному класифікують методи обробки та відновлення даних виходячи з типу даних та їх застосування.

Зокрема Лучкова С.В. та Перемітіна Т.О. методи відновлення втрачених даних умовно розділяють на *класичні методи*, відомі з теорії вірогідностей та статистики, та *некласичні методи*, засновані на машинному інтелекті, кластерному аналізі, нейронних мережах та нечіткій логіці [24]. Класичні методи різними способами відновлюють значення за наявними даними, але вони вимагають від даних певних умов, наприклад, нормальності розподілу, однорідності та повноти. Некласичні методи дають максимально точне відновлене значення пропуску, і при цьому не є вимогливими до структури спостережень.

Злоба І.Е. та Яцків І. пропонують поділяти алгоритми імпутації даних на прості та складні групи [15]. Прості алгоритми це неітеративні алгоритми, засновані на простих арифметичних операціях, відстанях між параметрами,

регресійному моделюванні. До них відносять: заповнення пропусків середнім арифметичним, регресійне моделювання пропусків, метод найближчих сусідів та методи підбору в групі. Складні алгоритми – це ітеративні алгоритми, які передбачають оптимізацію деякого функціоналу, що відображає точність розрахунку підставленого на місце пропуску значення. Їх розділяють на глобальні та локальні алгоритми. Суть глобальних алгоритмів в тому, що в оцінюванні кожного пропущеного значення беруть участь всі параметри розглянутої сукупності (метод Бартлета, EM-оцінювання та метод головних компонент). Локальні алгоритми полягають в тому, що в оцінюванні кожного пропущеного значення беруть участь повні спостереження, що знаходяться в деякій області прогнозованого значення.

Загалом методи обробки даних з пропусками поділяють на чотири групи:

- Методи виключення некомплектних об'єктів;
- Методи із заповненням;
- Методи зважування;
- Методи засновані на моделюванні.

Проте, відновлення пропусків польотних даних пов'язане з виконанням обчислень у режимі реального часу, доцільно виділити наступні групи методів:

- Статистичні методи імпутації даних;
- Методи засновані на моделі породження пропусків;
- Методи з використанням математичної моделі;
- Методи засновані на машинному інтелекті.

1.4.3.1. Статистичні методи імпутації даних

Статистичні методи імпутації даних ґрунтуються на статистичній обробці наявних даних. За аналізом наявних даних виконується оцінювання втраченого проміжку інформації. В результаті чого отримуються «повні» дані, що використовуються на наступних етапах обробки польотної інформації. Різні методи використовують різні підходи до оцінювання. Вибір конкретного методу залежить від характеру досліджуваного процесу та його впливу на керування БПЛА.

Найпростішим, але не зовсім точним підходом у відновленні даних є заповнення середнім значенням [23]. У цьому випадку підставляються середні з присутніх значень. При цьому можуть застосовуватись усі наявні дані чи лише певна їх кількість. Недоліком методу є спотворення розподілу даних.

У певних випадках можливим є заповнення пропусків останнім наявним з вимірних значень. Неприпустимим є застосування методу при швидкозмінюваних параметрах. Метод не потребує обчислювальних затрат та є найбільш застосовуваним.

Іншим підходом є заповнення пропусків сталою величиною. Наприклад значенням попереднього спостереження, чи певною константою.

Заповнення за регресією полягає у заповненні пропусків значеннями оціненими за регресією побудованої на наявних даних. Сутність регресійного підходу полягає у наближенні певної кількості даних деякою функцією мінімізуючи сукупність похибок. Регресія зводиться до підбору невідомих коефіцієнтів, що визначають аналітичну залежність. В залежності від кількості параметрів, що приймають участь у відновленні даних розрізняють одномірну (за одним параметром, що було втрачено) та багатомірну (за багатьма). Зокрема, у випадку одночасної відсутності двох параметрів доцільним є застосування багатомірної регресії. Найпростішим та найбільш вживаним типом регресії є лінійна регресія, адже наближення даних здійснюється лінійною функцією. Крім того, у якості функцій регресії можуть застосовуватись поліноми, сплайни, експоненти, логарифми та інші функції. Тип регресії обирається залежно від природи втрачених даних.

Недолік методу пов'язаний з тим, що якість відновлення пропусків безпосередньо залежить від успішного вибору, взятої за основу, регресійної моделі.

Багатовимірні адаптивні регресійні сплайни є доцільними для вирішення регресійних задач, в яких потрібно передбачити значення набору залежних змінних по набору незалежних [45, 61].

Метод сплайн-інтерполяції – математично обґрунтований метод інтерполяції, що має висоту точність заповнення пропусків. Для успішного застосування необхідно, щоб дані слідували умові MAR.

Аналіз усіх наявних даних вибірки стандартними методами нерівномірний і призводить до недоліків пов'язаних із зміщенням оцінок параметрів та погіршенням якості оцінок зі зростанням кількості пропусків. Тому, у деяких випадках, доцільним є використання методів локального заповнення пропусків. До таких методів належать методи сімейства Zet (Zet, ZetM, ZetBraid). Принцип їх дії ґрунтується на підборі для кожного пропуску значення не з усієї сукупності повних спостережень, а з деякої її частини, яку називають компонентною матрицею. За даними компонентної матриці будують функціональну залежність прогнозованого значення від відповідного значення в компонентній матриці, на основі якої прогнозують значення пропуску.

Метод Бартлетта полягає в підстановці початкових значень замість пропусків і проведенні коваріаційного аналізу цільової функції з розрахунком відхилень. До переваг цього методу відноситься не ітеративний характер. Метод вказує на вродженість пропусків.

Метод «Resampling» застосовують у випадку, коли значення для заповнення пропущених елементів вибирають випадковим чином із вихідної множини даних, де значення для заміни пропуску можна вибрати двома способами: із поверненням (раніше вибране значення може брати участь у заміні ще раз) і без повернення [49].

Перевагою «Resampling» методу є повторне використання вихідних даних, адже збільшення числа підвбірок дає можливість найбільш повно й інформативно використовувати вихідну інформацію. З іншого боку, кількість нової інформації зменшується для кожної нової підвбірки, оскільки збільшується вірогідність того, що ці елементи вибірки були вже вибрані раніше – це основний недолік методу.

1.4.3.2. Методи засновані на моделі породження пропусків

Окремо слід виділити широкий клас методів, які ґрунтуються на побудові моделі породження пропусків. Висновки отримують за допомогою функції правдоподібності, побудованої за умови справедливості цієї моделі з оцінюванням параметрів методами типу максимальної правдоподібності.

У методах, що використовують функцію правдоподібності, реалізована ідея обробки неповних даних: заповнення пропусків оцінками пропущених значень; оцінювання параметрів; повторне оцінювання пропущених значень (оцінки параметрів вважаються точними); повторне оцінювання параметрів до збіжності процесу. Переваги такого підходу полягають у тому, що він гнучкий, дає змогу відмовитися від методів, розроблених для окремих випадків. Недолік алгоритму полягає в тому, що швидкість збіжності може бути дуже низькою, якщо пропущено багато даних.

Метод максимальної правдоподібності дає можливість моделювати відсутні дані, ґрунтуючись на доступних даних і розглядаючи їх як репрезентативну вибірку деякого розподілу. Здебільшого цей метод є спробою створити модель, яка оптимізує імовірність знаходження відношень даних, що спостерігаються.

ЕМ-оцінювання (метод максимізації очікувань) дає можливість не тільки відновлювати пропущені значення з використанням двоетапного ітеративного алгоритму, а й оцінювати середні значення, коваріаційні та кореляційні матриці для кількісних змінних. ЕМ-алгоритм у найзагальнішому сенсі являє собою ітераційну процедуру, призначену для розв'язання завдань оптимізації деякого функціоналу через аналітичний пошук екстремуму цільової функції.

1.4.3.3. Методи з використанням математичної моделі досліджуваного об'єкту

У випадку можливості встановлення точної математичної залежності відсутнього параметра від наявних існує можливість прямого обчислення втрачених даних з певною похибкою математичної моделі. Більшість параметрів БАС пов'язані між собою певними аналітичними залежностями.

Відповідно до цього параметри розбиваються на групи пов'язаних параметрів та відновлюються у межах групи за іншими доступними даними. Простота та швидкість обчислень є перевагою даного методу. Основним недоліком є його застосування виключно до параметрів з аналітичними залежностями.

1.4.3.4. Методи засновані на машинному інтелекті

Метод на основі різноманіття малої розмірності полягає в тому, що набір точок, який є різноманіттям при наявності пропусків, дозволяє будувати лінійні і нелінійні моделі, за допомогою яких відновлюють пропущені значення. Результати алгоритмізації цих методів та експериментальних перевірок засвідчили досить високу точність. Проведені дослідження вказують на задовільне функціонування алгоритму при 10-15% пропусків. До недоліків слід також віднести складність реалізації та верифікації алгоритму [30].

Особливостями використання методів факторного аналізу є відсутність вимоги апріорного заповнення пропусків, необхідність у попередньому нормуванні даних [6, 39]. У разі використання нелінійних моделей даних метод має очевидну перевагу в порівнянні з регресійними методами. У зв'язку з великою кількістю кроків алгоритму, даному методу властива деяка трудомісткість реалізації.

Метод кластерного аналізу дозволяє класифікувати багатовимірні спостереження, кожне з яких описується набором вихідних даних. Даний метод простий у реалізації, а також дозволяє вказати бажаний порядок відновлення даних і виявити випадки, коли пропуски не можуть бути відновлені за наявними даними [13, 102].

Іншим підходом є застосування нейромережевих методів до відновлення втрачених даних [31]. Ці методи ґрунтуються на встановленні зв'язків між параметрами, шляхом машинного навчання та виділенні функцій нейронів мережі для кожного з її складових вузлів. Основною умовою застосування є наявність певного зв'язку між параметрами та даними. У випадку дії завад та значного спотворення даних, результати відновлення не гарантуватимуть високої точності. Однак, у такій ситуації подібні методи будуть шукати

закономірності у присутніх даних і забезпечать відновлення пропусків, на відміну від інших методів.

Еволюційний метод відновлення пропусків даних, ґрунтується на композиції нейронних мереж та генетичного алгоритму [34]. Тобто вхідні дані для навчання нейронної мережі мають пропуски значень, і необхідно вирішити задачу параметричної оптимізації за допомогою генетичного алгоритму. Розроблений еволюційний метод має ряд переваг. Зокрема, його використання не має обмежень на вихідну інформацію, пов'язаних з лінійністю моделі чи розподілом параметрів. Таблиця вихідних даних може мати довільну розмірність і структуру пропусків.

1.5. Постановка задач дослідження

Однією з важливих проблем моніторингу стану БПЛА є наявність пропусків даних та аномальних значень у результатах вимірювань різноманітних датчиків системи. З наведених вище методів відновлення даних найбільш доречними є статистичні методи імпутації даних. Проте для більш точного відновлення пропусків доцільно використовувати багатомірну регресію за всіма наявними параметрами БПЛА та враховувати вплив похибок вимірювального обладнання. Тому, виникає потреба у розробці нового методу багатопараметричного відновлення пропусків даних у БАС, що враховуватиме недоліки існуючих методів.

Відновлені дані безумовно впливають на клас наявної польотної ситуації, а похибки відновлення на безпеку польотів БАС. Відповідно до цього, іншим пов'язаним завданням є процес класифікації наявної польотної ситуації БПЛА з урахуванням відновлених даних.

Сформулюємо основні задачі, вирішення яких необхідне для поставленої мети:

1. Розробити метод багатопараметричного відновлення втрачених чи коригування аномальних польотних даних у БАС, що використовує інформацію про наявні параметри польоту для заповнення пропусків даних та враховуватиме похибки вимірювального обладнання.

2. Розробити багатоальтернативну класифікацію польотних ситуацій для аналізу відхилень параметрів БПЛА від їх запланованих значень.
3. Удосконалити метод багатоальтернативної класифікації з оцінюванням ймовірності класу наявної польотної ситуації на основі розрахунку величин відхилень параметрів БПЛА від запланованих значень та метрики класів.
4. Провести верифікацію розроблених методів шляхом комп'ютерного моделювання та експериментальних випробувань.

Висновки до розділу 1

1. Визначено роль БАС у сьогодні. Наведено класифікацію БПЛА за ризиком зіткнення із землею поверхнею, за критерієм максимальної злітної маси, за висотою польоту, за рівнями автономності. Також представлено узагальнюючу класифікацію. Різні підходи до класифікації БПЛА дозволяють враховувати особливості функціонування відповідно до типу польотного завдання. Проведено аналіз можливих галузей застосування БАС.
2. Розглянуто структуру побудови типової БАС. Проаналізовано бортове обладнання БПЛА, наведено їх функціональні особливості, що дозволяє встановити основні джерела польотної інформації БАС. Розглянуті тенденції розвитку БПЛА до 2035 року, за якими виділено основні напрямки технічного розвитку БАС, що відображають стратегічні пріоритети.
3. Проаналізовано фактори, що впливають на функціонування БАС, за якими виділено три основні зони їх дії: конструкцію БАС її функціонування та вплив людського чинника. Наведено принципи множинної класифікації польотних ситуацій. Проведено аналіз класифікації ситуацій для літаків, БПЛА цивільного та військового призначення, за результатами якого виділено спільні ознаки та відмінності, що пов'язані з особливостями польотного завдання БПЛА.
4. Виділено чотири підходи для аналізу польотної інформації, а саме дисперсійний, регресійний, кореляційний та коваріаційний аналізи. За проведеною класифікацією методів відновлення даних виділено такі групи методів застосовуваних для відновлення пропусків польотних даних: статистичні методи імпутації даних, методи засновані на моделі породження пропусків, методи з використанням математичної моделі, методи засновані на машинному інтелекті. Розглянуті основні переваги та недоліки кожного з методів, що дозволяє сформулювати задачу у

створенні нового методу багатопараметричного відновлення польотних даних у БАС.

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

РОЗДІЛ 2

МЕТОД БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ДАНИХ У БЕЗПЛОТНІЙ АВІАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ

2.1. Суть методу

Розглянуті методи відновлення польотних даних у п.п. 1.4.3 (стор. 40) орієнтовані на застосування з певними обмеженнями, що пов'язані з природою вхідних даних та технічними можливостями їх реалізації. Відновлення параметрів динамічної системи пов'язане з впливом похибок вимірювального обладнання (різноманітних датчиків польотної інформації) та плинності процесу. Крім того, частота вимірювань, що пов'язана з безпекою руху, висуває жорсткі вимоги до швидкості обчислення. З іншої точки зору метод відновлення даних у БАС повинен відповідати вимогам безпеки повітряного руху та забезпечувати необхідну для цього достовірність відновлення польотних даних.

Принцип дії запропонованого методу багатопараметричного відновлення даних у БАС наведено на рис. 2.1.

Обладнання БАС постійно виконує вимірювання параметрів стану системи та іншої інформації (наприклад навколишнього середовища). Результати вимірювань формують матриці вимірювальних параметрів та фіксуються у відповідних файлах даних (лог-файлах). Окрім результатів вимірювання датчики БАС надають матриці стану вимірювального обладнання. Дані про достовірність вірного функціонування вимірювальних пристроїв та систем, що вимірюють параметри є важливими для функціонування БАС. У якості достовірності правильного функціонування використовуються разові команди справності параметра чи датчика або системи, що їх видала. При цьому, оцінювання достовірності параметра виконується джерелом цієї інформації або спеціальною системою моніторингу роботоспроможності обладнання.

Відповідно до цього, передбачається надходження разом з даними БАС даних про справність джерел, що генерують ці дані у бінарному вигляді.

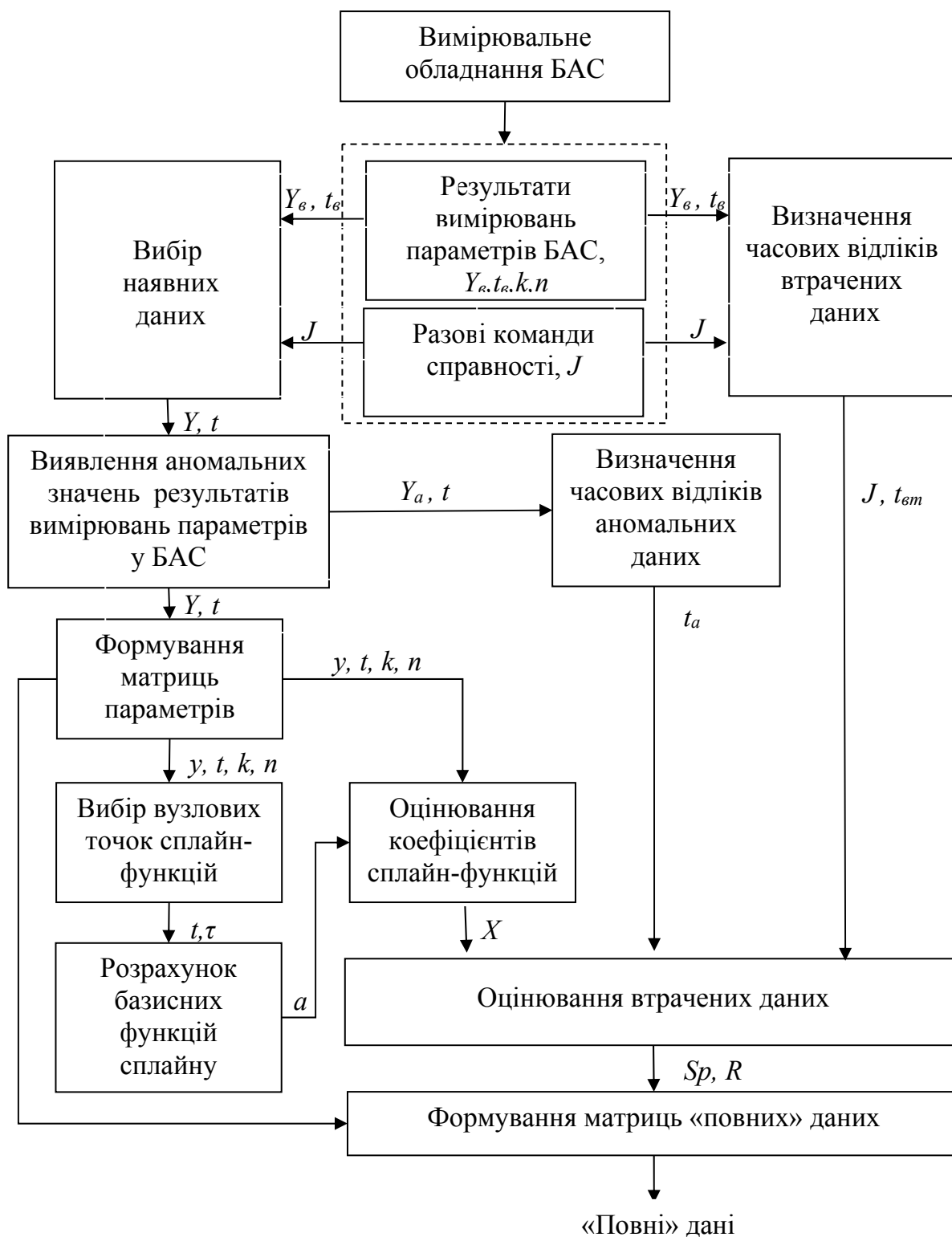


Рис. 2.1. Структурна схема функціонування методу багатопараметричного відновлення даних

Після декодування разових команд стану датчиків виконується вибір наявних даних та визначаються часові відліки втрати даних шляхом порівнювання разових команд з даними, що надходять.

На наступному етапі задіюються критерії пошуку аномальних даних, що є результатом дії випадкових похибок під час вимірювання (п.п. 2.6, стор. 69). Аномальні дані значно відрізняються від решти вимірювань та мають бути виправлені, тому вони вважаються помилковими та помічаються як втрачені, а відліки їх появи позначаються як відліки втрачених даних, для яких у подальшому буде здійснюватися відновлення. Аномальні дані та часові відліки їх появи видаляються з наявних даних, а за рештою інформації формуються матриці параметрів, що будуть використані для процесу відновлення.

Відновлення втрачених даних пропонується виконувати шляхом їх інтерполяції сплайн-функціями з використанням багатопараметричного підходу з використанням усіх наявних параметрів.

За відомими параметрами та їх часовими відліками виконується вибір вузлових точок (п.п. 2.4, стор. 64), розраховуються базисні функції сплайну та оцінюються коефіцієнти сплайн-функцій (п.п. 2.3, стор. 56).

За отриманими компонентами сплайн-функцій оцінюються значення параметрів на часові відліки їх пропуску (п.п. 2.7, стор. 74).

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

2.2. Вибір сплайн-функції

Сплайн-інтерполяція на сьогоднішній день є одним із найточніших методів наближення. Широке використання сплайнів пояснюється їх високою точністю наближення, що є дуже важливим при розв'язуванні практичних задач [79].

Сплайн-функція – це кусково-гладка кубічна поліноміальна функція, перша та друга похідна якої неперервні на різних ділянках кривої.

Сплайнами називають функції, «склеєні» з «кусків» многочленів. Функція $s(t)$, задана та неперервна на відрізку $[a, b]$, називається сплайном порядку m з вузлами τ_i ($i=[1, n]$; $a < \tau_1 < \tau_2 \dots < \tau_n < b$).

Сплайнова крива задається набором координат точок, що називаються контрольними точками та вказують загальну форму кривої. За даними точками підбирається кусково-неперервна параметрична поліноміальна функція.

Інтерполяційною кривою вважається крива, створена в результаті з'єднання усіх контрольних точок за допомогою поліноміальних частин.

Природні кубічні сплайн-функції. При визначенні сплайну дві сусідні ділянки кривої мають рівні перші та другі похідні по параметру в їх спільній точці. Таким чином, природні кубічні сплайн-функції мають неперервність другого порядку. Вони мають недолік, пов'язаний з тим, що зміна положення будь-якої контрольної точки призводить до зміни всієї кривої. Вони не придатні для локального управління, тому частину кривої неможливо реструктурувати, не задаючи нового набору контрольних точок.

Ермітовий сплайн – це інтерполюючий кусково-кубічний поліном з заданою дотичною в кожній контрольній точці. На відміну від природніх кубічних сплайнів, ермітові сплайни можна налаштовувати локально, оскільки кожна ділянка кривої залежить тільки від умов в кінцевих точках.

Фундаментальний сплайн – це інтерполюючий кусково-кубічний поліном з заданою дотичною в кожній контрольній точці. На відміну від ермітових сплайнів значення дотичних в кінцевих точках задавати не потрібно. Для фундаментального сплайну дотична в контрольній точці розраховується по координатам двох сусідніх контрольних точок.

Сплайни Коханека-Бартелса – це інтерполюючі кусково-кубічні поліноми, що являються розширенням фундаментальних сплайнів.

У рівняння умов вводять два додаткових параметри, визначаючи сплайни Коханека-Бартелса, що підвищують гнучкість в налаштуванні форм сегментів кривих.

Раціональні сплайни представляють собою відношення двох поліномів, тобто двох сплайнових функцій. Переваги раціональних сплайнів щодо нераціональних полягають у тому, що вони точно представляють криві другого порядку, такі як кола та еліпси.

Сплайни Безьє. Ділянку кривої Безьє можна підібрати по будь-якій кількості контрольних точок. Степінь полінома Безьє визначається кількістю контрольних точок та їх відносним розташуванням.

Крива Безьє з'єднує першу та останню контрольні точки. Крива сплайну лежить всередині випуклої оболонки, сформованої контрольними точками.

Кубічні криві Безьє визначаються чотирма контрольними точками. Вони не допускають локального контролю за формою кривої. Якщо змістити будь-яку контрольну точку, форма усієї кривої також змінюється. Використовуються для побудови складних сплайнових кривих.

B-сплайни є найбільш використовуваним типом сплайн-функцій. Вони утворюються шляхом апроксимації набору контрольних точок. У порівнянні зі сплайнами Безьє мають переваги у тому, що степінь полінома *B-сплайна* можна задати незалежно від числа контрольних точок, а також вони допускають локальний контроль над формою кривої. Окрім локального контролю *B-сплайни* дозволяють змінювати кількість контрольних точок, що використовуються для побудови кривої, без зміни степені поліному.

Вираз для розрахунку координат точок *B-сплайна* можна записати, використовуючи концепцію функції стикування:

$$S(t) = \sum_{k=0}^n x_k B_{k,m}(t), \quad 2 \leq m \leq n+1,$$

де x_k – вхідний набір з $n+1$ контрольних точок; функції стикування $B_{k,m}(t)$ – поліноми степені $m-1$; m – параметр степені.

B-сплайни мають наступні властивості:

- поліноміальна крива має степінь $m-1$ та неперервність C^{m-2} в діапазоні зміни параметру t ;
- при $n+1$ контрольних точок крива описується $n+1$ функціями стикування;

- кожна функція стикування $B_{k,m}(t)$ визначена на m під-інтервалах загального діапазону t , починаючи з значення вузла τ_k ;
- діапазон параметра t ділиться на $n+m$ інтервалів $n+m+1$ значеннями, заданими в векторі вузлів;
- якщо значення вузлів позначити $\{\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_{n+m}\}$ отриманий B -сплайн визначається лише в інтервалі від значення вузла τ_{m-1} до значення τ_{n+1} ;
- кожна ділянка сплайна визначається m контрольними точками;
- будь-яка контрольна точка може впливати на форму максимум m ділянок кривої.

Окрім того, B -сплайн знаходиться всередині випуклої оболонки максимум $m+1$ контрольних точок. Для будь-якого значення t в інтервалі від вузлового значення τ_{m-1} до τ_{n+1} сума всіх базисних функцій дорівнює 1. Тобто,

$$\sum_{k=0}^n B_{k,m}(t) = 1.$$

Для даного розташування контрольних точок та значення параметра степені m необхідно задати значення вузлів, щоб отримати функції стикування, використовуючи співвідношення Кокса-де Бура.

Існує дві класифікації векторів вузлів: рівномірна та нерівномірна. B -сплайни часто описуються відповідно до класу вибраного вектора вузлів. Узагальненням B -сплайнів є бета-сплайни. Вони формулюються накладенням умови геометричної неперервності на першу та другу похідні по параметру. Параметри неперервності бета-сплайнів називаються параметрами β .

B -сплайни є більш практичними у використанні ніж природні сплайни, оскільки поліноміальні коефіцієнти природних сплайнів вимагають всіх N вузлових точок. Їх обчислення залучає розв'язання $N+1$ на $N+1$ вимірних матриць. У цьому є два недоліки: переміщення однієї вузлової точки зачіпає всю криву і під час розв'язування матриці можна зіткнутися з швидкою зміною кривої. З іншого боку, B -сплайни складаються з сегментів кривих, залежних тільки від кількох вузлових точок, що обумовлює локальний контроль. Таким чином, переміщення вузлової точки зачіпає тільки невелику частину кривої.

B -сплайни мають ту ж саму неперервність, як і природні сплайни, але не інтерполюють їх вузлові точки.

Для досягнення бажаної гладкості першим кроком є вибір порядку базису сплайнів.

Найефективнішими були вибрані кубічні B -сплайни, тобто сплайни третього порядку, враховуючи наступні фактори:

1. Поліноми нижніх степенів дають дуже низьку гнучкість в управлінні формою кривої. B -сплайни першого порядку не дають задовільної гладкості апроксимуючої кривої. B -сплайни другого порядку дають гладку криву, але виникає проблема в точках з'єднання сегментів кривої. B -сплайни другого порядку не гарантують задовільну неперервність в точках об'єднання сегментів кривої. Використання кубічних B -сплайнів, які є C^0 , C^1 і C^2 неперервними дозволяють вирішити вказану проблему.

2. Поліноми вищого степеню потребують більше часу в обчислювальному процесі і можуть призводити до небажаних скачків апроксимації.

3. Кубічні B -сплайни дозволяють отримати достатню неперервність необхідну для обробки експериментальних даних.

Отже, не зважаючи на деякі складнощі у розрахунках, у порівнянні з іншими способами для застосування у задачах наближення, вибір кубічних B -сплайнів пояснюється більшою точністю його результатів.

2.3. Оцінювання коефіцієнтів сплайн-функцій

Розглянемо вхідні дані, що містять n результатів вимірювань k параметрів руху за певний проміжок часу, наприклад від початку роботи ($t=0$) системи, до певного моменту часу ($t=T$):

$$y = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_k(t) \end{bmatrix}, \text{ де } t \in [0, T].$$

Кожна строчка матриці y містить результати вимірювань певного параметру. У загальному випадку матрицю y можна представити у вигляді сплайнових функцій з певною похибкою:

$$\bar{y}_i = \bar{S}_0(t_i) + \bar{\xi}_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2.1)$$

де $\bar{S}_0(t_i) = \begin{bmatrix} S_0^{(1)}(t_i) \\ \vdots \\ S_0^{(k)}(t_i) \end{bmatrix}$ – кубічні сплайни з неперервністю другого порядку,

$\bar{\xi}_i = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_k \end{bmatrix}$ – вектор випадкових помилок.

Вузли сплайн-функцій τ розміщені у порядку їх зростання:

$$\tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_N.$$

Причому, перший вузол сплайн-функцій співпадає з початком спостереження даних $\tau_0 = 0$, а кінцевий вузол відповідає останньому значенню часу спостереження, тобто $\tau_N = T$.

Оскільки маємо справу з результатами спостережень плинного процесу то моменти спостережень впорядковані:

$$t_1 < t_2 < \dots < t_n.$$

Причому $t_1=0$ та $t_n=T$. Окрім того, вузли сплайн-функцій розміщені таким чином, щоб виконувалась умова:

$$t_n > \tau_{N-1}.$$

Будемо вважати, що випадкові похибки $\bar{\xi}_i$ є незсуненими, тобто їх математичне сподівання дорівнює нулю [10]:

$$E \bar{\xi}_i = \bar{0}, \quad i \geq 1.$$

Крім того, оскільки кожний параметр вимірюється постійно одним з датчиків чи створюється однією системою припустимо, що вектори випадкових похибок $\bar{\xi}_i$ незалежні, причому для їх кореляційних матриць вигляду [10, 50]:

$$D \bar{\xi}_i = E \bar{\xi}_i \bar{\xi}_i^T, \quad (2.2)$$

Запишемо (2.2) у матричному вигляді:

$$E_{\vec{\xi}_i \vec{\xi}_i^T} = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \vdots \\ \xi_k \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \xi_1 & \xi_2 & \dots & \xi_k \end{bmatrix},$$

$$E_{\vec{\xi}_i \vec{\xi}_i^T} = \begin{bmatrix} \xi_1^2 & \xi_1 \xi_2 & \dots & \xi_1 \xi_k \\ \xi_2 \xi_1 & \xi_2^2 & \dots & \xi_2 \xi_k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_k \xi_1 & \xi_k \xi_2 & \dots & \xi_k^2 \end{bmatrix}.$$

Оскільки:

$$E_{\xi_i^2} = \sigma_i^2 \text{ та } E_{\xi_{i_1} \xi_{i_2}} = 0, i_1 \neq i_2,$$

тоді, виконується наступна умова:

$$D_{\vec{\xi}_i} = \sigma_0^2 S_i, i \geq 1, \quad (2.3)$$

де $\sigma_0^2 > 0$ – невідома дисперсія одиниці ваги;

$$S_i = \begin{bmatrix} \sigma_{i,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{i,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{i,k} \end{bmatrix} - \text{відомі додатно визначені матриці розміром } k \times k,$$

що містять похибки вимірювального обладнання.

Відповідно до зазначених вище припущень виконаємо оцінювання коефіцієнтів сплайн-функцій $\vec{S}_0(t_i)$ (2.1) за спостереженнями для проміжку часу $0 \leq t \leq T$.

У якості сплайн-функції будемо застосовувати B -сплайни з певною сіткою вузлів $\tau_i, i=[0, N]$.

B -сплайни визначаються функцією:

$$S(t) = \sum_{j=1}^{N+3} x_j B_j(t), 0 \leq t \leq T, \quad (2.4)$$

де $S(t)$ – результат інтреполяції сплайну на час t ,

x_j – вектор контрольних точок сплан функцій,

$B_j(t)$ – базисні функції B -сплайну.

У якості базисної функції B -сплайну використаємо функцію Кокс-Де Бура [52], що визначає j -ту базисну функцію B -сплайну певного степені. Для $m=1$ функція буде мати вигляд:

$$B_{j,1}(t) = \begin{cases} 1, & \tau_j \leq t \leq \tau_{j+1} \\ 0, & \tau_j > t > \tau_{j+1} \end{cases},$$

для $m \geq 2$:

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

Так для третього степені ($m=3$) B -сплайну базисні функції Кокс-Де Бура з рівномірною сіткою вузлів на проміжку часу від 0 до 200 с будуть мати вигляд представлений на рис. 2.2.

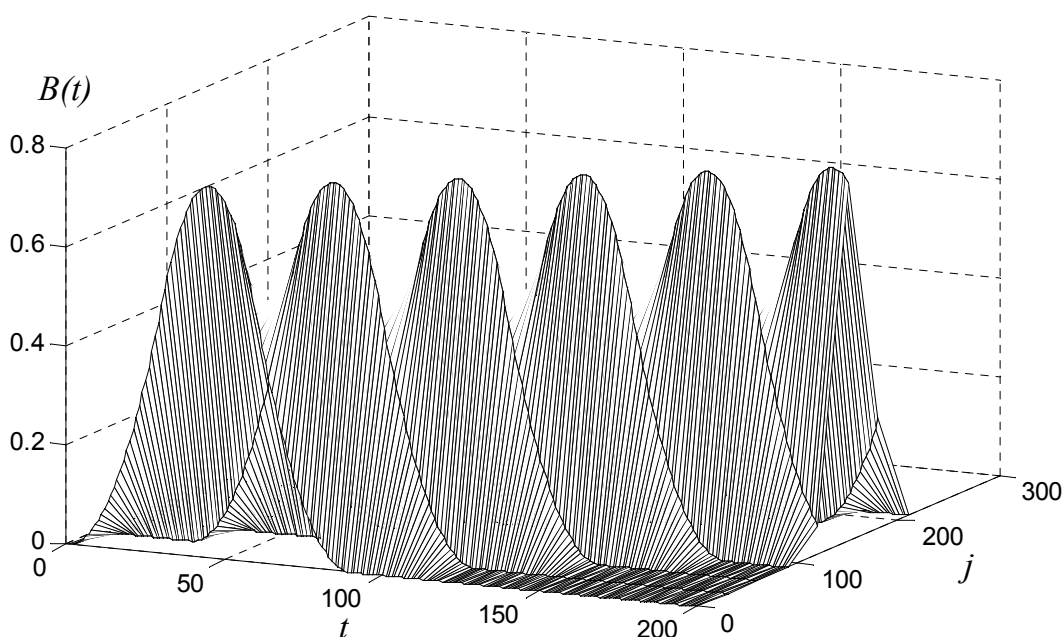


Рис. 2.2. Функції Кокс-Де Бура третього степені ($m=3$) B -сплайну

Для розв'язку сплайну, тобто для оцінювання контрольних точок сплайну $\bar{S}_0(t_i)_i$, застосуємо метод зважених найменших квадратів. Застосування методу зважених найменших квадратів призводить до зменшення дисперсії оцінок у порівнянні зі звичайним методом найменших квадратів [50]. Для цього введемо цільову функцію

$$\tilde{Q}(\vec{S}) = \sum_{i=1}^n \left[S_i^{-1} (\vec{y}_i - \vec{S}(t_i))^T \times (\vec{y}_i - \vec{S}(t_i)) \right], \quad (2.5)$$

де $\vec{S} = [S^{(1)}, S^{(2)} \dots S^{(k)}]$, причому кожний $S^{(j)}$ знаходиться у межах простору кубічних C^2 сплайнів $S_3(\Delta)$, тобто

$$S^{(j)} \in S_3(\Delta), \quad j = \overline{1, k}.$$

Цільова функція (2.5) відображає суму квадратів відхилень сплайну від наявних результатів вимірювань за певним параметром.

Контрольні точки сплайн-функції $\hat{S} = \hat{S}(t)$ оцінюються шляхом пошуку глобального мінімуму цільової функції (2.5). Оскільки, у оцінці приймають участь дані всіх параметрів, тоді розклад (2.4) використаємо для кожного з параметрів, тобто виконаємо параметризацію. У відповідності з розкладом (2.4) маємо для компонентів векторної функції $\vec{S} = \vec{S}(t)$:

$$S^{(p)}(t) = \sum_{j=1}^{N+3} x_{jp} B_j(t), \quad \text{де } p = \overline{1, k} \quad (2.6)$$

$$\text{Позначимо } \vec{a}_i = \begin{bmatrix} B_1(t_i) \\ B_2(t_i) \\ \vdots \\ B_{N+3}(t_i) \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,k} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{(N+3),1} & x_{(N+3),2} & \cdots & x_{(N+3),k} \end{bmatrix}.$$

Матриця X – це матриця контрольних точок по параметрам, розміром $(N+3)$ на k . Тоді вираз (2.6) можна представити у наступному матричному вигляді:

$$\vec{S}(t_i) = X^T \vec{a}_i, \quad \text{де } i = \overline{1, n} \quad (2.7)$$

Цільова функція (2.5) може бути представлена з урахуванням (2.7) для всіх параметрів:

$$\tilde{Q}(\vec{S}) = Q(X) = \sum_{i=1}^n \left[\left(S_i^{-1} (\vec{y}_i - X^T \vec{a}_i)^T \right) \times (\vec{y}_i - X^T \vec{a}_i) \right], \quad (2.8)$$

За методом зважених найменших квадратів, оцінка матриці контрольних точок знаходиться шляхом пошуку мінімального значення функції:

$$\hat{X} = \arg \min Q(X), \quad X \in \mathfrak{R}^{(N+3) \times k},$$

де $\mathfrak{R}^{(N+3) \times k}$ – простір усіх дійсних матриць $(N+3) \times k$.

Оцінені значення контрольних точок формують матрицю:

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

аналогічно:

$$\vec{a}(t) = \begin{bmatrix} B_1(t_i) \\ B_2(t_i) \\ \vdots \\ B_{N+3}(t_i) \end{bmatrix} \text{ та } \hat{S}(t) = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+3} \hat{x}_{j1} B_j(t) \\ \sum_{j=1}^{N+3} \hat{x}_{j2} B_j(t) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^{N+3} \hat{x}_{jk} B_j(t) \end{bmatrix}, \text{ причому } 0 \leq t \leq T.$$

Тоді, для оцінених значень справедливо:

$$\hat{S}(t) = \hat{X}^T \vec{a}(t), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (2.9)$$

Отримані оцінки контрольних точок є незсуненими і їх математичне сподівання відповідає значенням для істинного сплайну:

$$E\hat{X} = X_0,$$

де X_0 – матриця контрольних точок розкладу з (2.7) для компонентів істинного сплайна $\vec{S}_0(t)$.

Оцінені значення сплайну запишемо аналогічно:

$$E\hat{S}(t) = \vec{S}_0(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.10)$$

Відповідно сплайн $\hat{S}(t)$ використовується для оцінювання польотних даних на необхідний момент часу.

Матриця контрольних точок \hat{X} оцінюється шляхом пошуку глобального мінімуму цільової функції, тобто шляхом пошуку похідної від цільової функції та прирівнюванням її до нуля.

Спершу знайдемо похідну цільової функції (2.8) за напрямком $H \in \mathfrak{R}^{(N+3) \times k}$:

$$\frac{\partial Q(X)}{\partial H} = 2 \sum_{i=1}^n \left[\left(S_i^{-1} (X^T \vec{a}_i - \vec{y}_i)^T \right) \times (H^T \vec{a}_i) \right],$$

$$\frac{\partial Q(X)}{\partial H} = 2 \sum_{i=1}^n \left[(X^T \bar{a}_i - \bar{y}_i)^T S_i^{-1} H^T \bar{a}_i \right].$$

Використаємо слід матриці, для позначення суми діагональних елементів матриці, отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q(X)}{\partial H} &= 2 \sum_{i=1}^n \text{tr} \left[(X^T \bar{a}_i - \bar{y}_i)^T S_i^{-1} H^T \bar{a}_i \right], \\ \frac{\partial Q(X)}{\partial H} &= 2 \sum_{i=1}^n \text{tr} \left[(X \bar{a}_i^T - \bar{y}_i^T) S_i^{-1} H^T \bar{a}_i \right], \\ \frac{\partial Q(X)}{\partial H} &= 2 \sum_{i=1}^n \text{tr} \left[(\bar{a}_i \bar{a}_i^T X S_i^{-1} - \bar{a}_i \bar{y}_i^T S_i^{-1}) H^T \right]. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Наприклад, якщо матриці C та D мають узгоджені розміри, тоді використаємо таку властивість сліду матриці:

$$\text{tr}(CD) = \text{tr}(DC).$$

Для оцінювання матриці \tilde{X} знайдемо глобальний мінімум функції, шляхом прирівнювання похідної (2.11) за напрямом до нуля:

$$\frac{\partial Q(X)}{\partial H} = 0, \text{ при всіх } H \in \mathfrak{R}^{(N+3) \times k}.$$

Остаточно маємо з (2.11) нормальне рівняння для оцінювання матриці коефіцієнтів сплайну:

$$\sum_{i=1}^n \bar{a}_i \bar{a}_i^T X S_i^{-1} = \sum_{i=1}^n \bar{a}_i \bar{y}_i^T S_i^{-1}. \quad (2.12)$$

Для розв'язку рівняння (2.12) використаємо властивості векторизації матриці. Позначимо

$$\text{vec}(X) \in \mathfrak{R}^m, \text{ де } m = k(N+3).$$

Векторизована матриця $\text{vec}(X)$ уявляє собою вектор-стовпчик, в якому згори вниз розташовані послідовно перший, другий і т.д. k -й стовпчики матриці X . Тобто, якщо

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

тоді:

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

Для векторизованих матриць (наприклад C та D) з узгодженими розмірностями справедлива наступна формула з використанням Кронекерівського добутку матриць [86, стор.147]:

$$\text{vec}(CXD) = (D^T \otimes C)\text{vec}(X). \quad (2.13)$$

Кронекерівській добуток матриць для двох квадратних матриць розраховується наступним чином:

$$(C \otimes D) = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} \\ c_{2,1} & c_{2,2} \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{2,1} \\ d_{2,1} & d_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{1,1}d_{1,1} & c_{1,1}d_{2,1} & c_{2,1}d_{1,1} & c_{2,1}d_{2,1} \\ c_{1,1}d_{2,1} & c_{1,1}d_{2,2} & c_{2,1}d_{2,1} & c_{2,1}d_{2,2} \\ c_{2,1}d_{1,1} & c_{2,1}d_{2,1} & c_{2,2}d_{1,1} & c_{2,2}d_{2,1} \\ c_{2,1}d_{2,1} & c_{2,1}d_{2,2} & c_{2,2}d_{2,1} & c_{2,2}d_{2,2} \end{bmatrix}.$$

Отже, представимо (2.12) у векторизованому вигляді:

$$\sum_{i=1}^n \text{vec}(\bar{a}_i \bar{a}_i^T X S_i^{-1}) = \sum_{i=1}^n \text{vec}(\bar{a}_i \bar{y}_i^T S_i^{-1}). \quad (2.14)$$

Застосуємо властивість векторизованих матриць (2.13) до рівняння (2.14), отримаємо:

$$\sum_{i=1}^n \left((S_i^{-1})^T \otimes (\bar{a}_i \bar{a}_i^T) \right) \text{vec}(X) = \sum_{i=1}^n \text{vec}(\bar{a}_i \bar{y}_i^T S_i^{-1}).$$

Оскільки вектор X не залежить від індексу i , винесемо його з під знаку суми:

$$\text{vec}(X) \sum_{i=1}^n \left((S_i^{-1})^T \otimes (\bar{a}_i \bar{a}_i^T) \right) = \sum_{i=1}^n \text{vec}(\bar{a}_i \bar{y}_i^T S_i^{-1}). \quad (2.15)$$

Остаточно матимемо залежність для пошуку контрольних точок сплайн-функцій:

$$\text{vec}(X) = \frac{\sum_{i=1}^n \text{vec}(\bar{a}_i \bar{y}_i^T S_i^{-1})}{\sum_{i=1}^n \left((S_i^{-1})^T \otimes (\bar{a}_i \bar{a}_i^T) \right)}. \quad (2.16)$$

Виконавши обернену операцію до векторизації матриці отримаємо оцінені значення матриці контрольних точок \hat{X} .

2.4. Вибір вузлових точок сплайн-функцій

Вузлові точки сплайн-функцій уявляють собою точки з'єднання окремих сплайн-функцій разом у загальну функцію. Тобто, вузлові точки розбивають проміжок даних на певні інтервали, кожному з яких відповідає певна сплайн-функція інтерполяції. Вибір місцеположення вузлових точок є одним з важливих елементів, що впливає на точність інтерполяції сплайном. Загалом існують різні підходи до вибору вузлових точок, проте найбільш застосовуваними є рівномірне розміщення, метод хорд та доцентровий.

За рівномірним методом вузлові точки розміщуються рівномірно по усьому проміжку наявних даних $[a, b]$. Першою вузловою точкою має бути $\tau_0 = a$, а останньою $\tau_N = b$. Оскільки N точок розбивають інтервал на $N-1$ підінтервалів, тоді довжина кожного інтервалу може бути обчислена за співвідношенням:

$$D = \frac{b - a}{N - 1}.$$

Загалом проміжні точки знаходяться наступним чином:

$$\tau_i = a + (i - 1) \frac{b - a}{N - 1}, \text{ де } i = 1, \dots, N.$$

Реалізація даного методу дуже проста, проте у випадку нерівномірного розміщення вхідних даних, що можливе у випадку втрати даних, цей метод показує погані інтерполяційні характеристики. Приклад інтерполяції за рівномірним методом вибору вузлових точок наведено на

рис. 2.3.

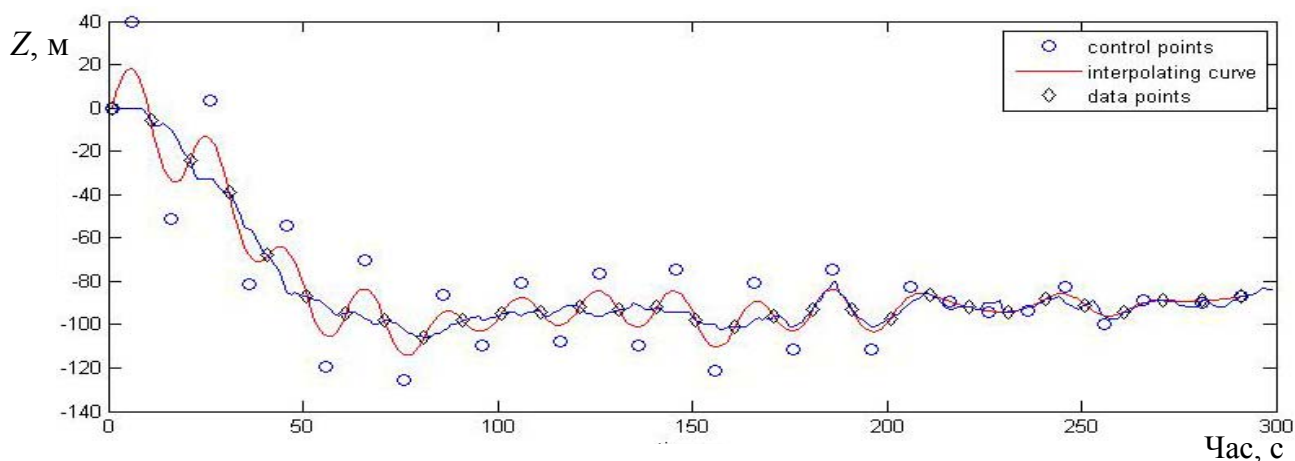


Рис. 2.3. Результат інтерполяції сплайном з рівномірним розподілом вузлів

Метод Хорд більш підходить у випадку, якщо сплайн-функцію необхідно наблизити найближче до даних вимірювання при цьому сегмент сплайну має максимально наближатися до хордової відстані між найближчими точками даних. Загальна довжина кривої даних може бути обчислена:

$$L = \sum_{i=2}^n |y_i - y_{i-1}|.$$

Відношення довжини хорди до загальної довжини:

$$L_k = \frac{\sum_{i=2}^k |y_i - y_{i-1}|}{L}.$$

Аналогічно до рівномірного методу перше та останні значення є початком та кінцем вимірювань. Інші значення обчислюються наступним чином:

$$\tau_i = a + L_i(b - a).$$

Приклад інтерполяції за методом хорд вибору вузлових точок наведено на рис. 2.4.

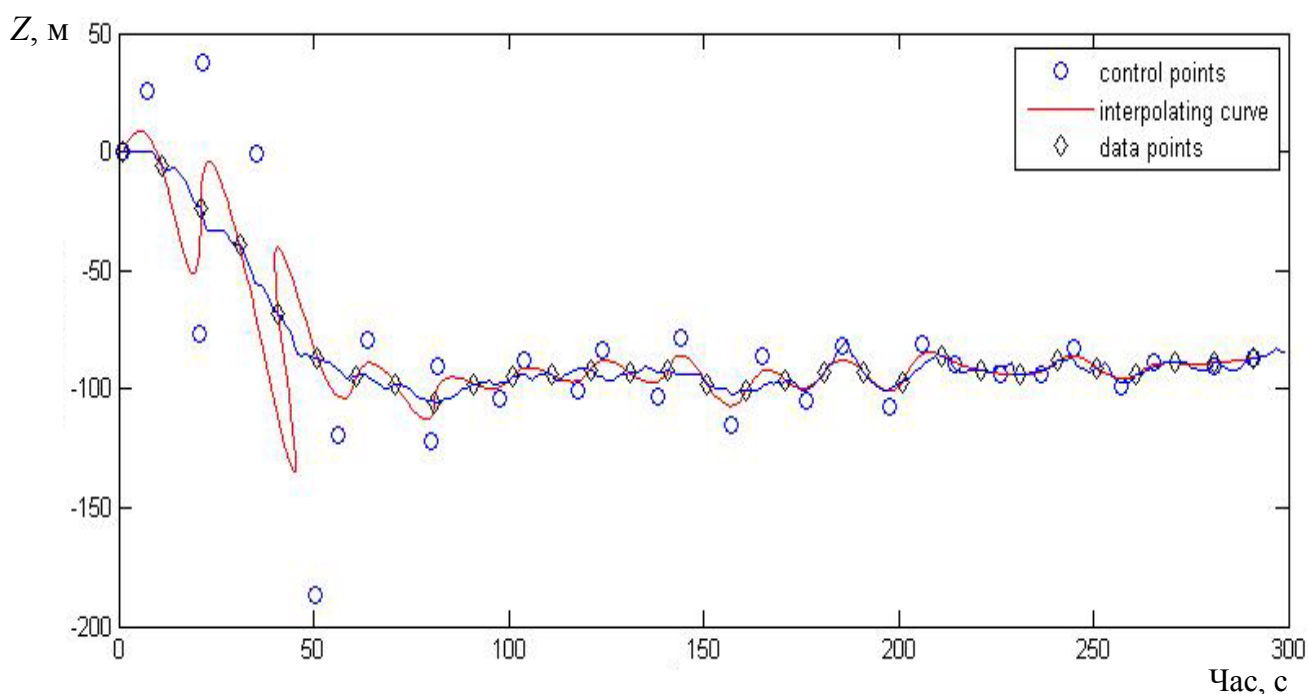


Рис. 2.4. Результат інтерполяції сплайном з вузлами обчисленими за методом хорд

Доцентровий метод враховує хордове відношення до довжини останнього сегмента та обчислюється за формулою:

$$L_k = \frac{\sum_{i=2}^k \sqrt{|y_i - y_{i-1}|}}{\sum_{i=2}^n \sqrt{|y_i - y_{i-1}|}}.$$

Результати інтерполяції вхідних даних сплайнами з оцінюванням вузлових точок за доцентровим методом наведено на рис. 2.5.

У загальному випадку при розробці програмного забезпечення використовують узагальнену формулу для обчислення кроку сплайну:

$$L_k = \frac{\sum_{i=2}^k |y_i - y_{i-1}|^\alpha}{L} \quad (2.17)$$

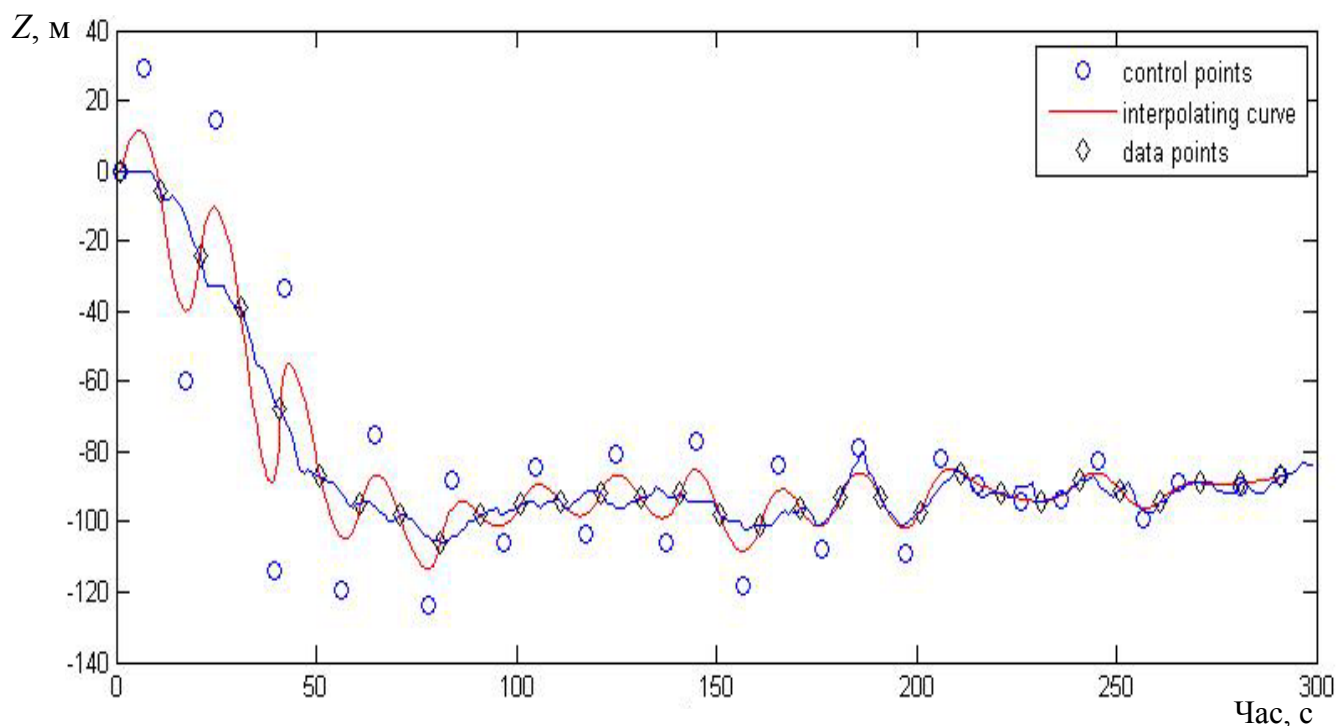


Рис. 2.5. Результат інтерполяції сплайном з вузлами обчисленими за доцентровим методом

Вибір методу розрахунку виконується за допомогою коефіцієнта α . Так, $\alpha=0$ – для рівномірного методу, $\alpha=0.5$ – для доцентрового, та $\alpha=1$ – методу хорд.

Похибки кожного з наведених методів вибору вузлових точок наведено на рис. 2.6.

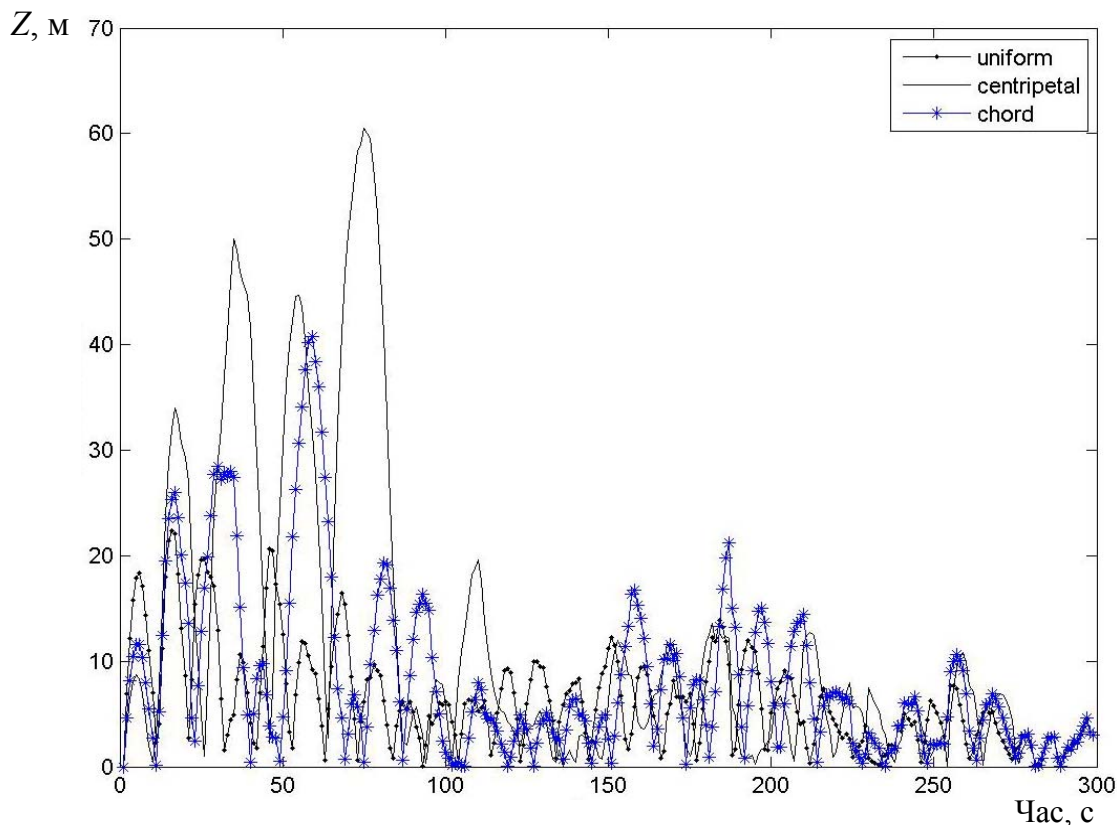


Рис. 2.6. Похибки інтерполяції за рівномірним, доцентровим методом та методом хорд

2.5. Оцінювання втрачених даних у БАС

Характеристики будь-якої навігаційної системи визначаються її точністю, доступністю, неперервністю і цілісністю [48]. З точки зору безпеки, цілісність вважається найбільш важливим фактором. Без гарантії цілісності системи немає можливості знати, чи інформація, що сприймається є точною.

Точність – є ступінь відповідності між оціненими вимірами розташування споживача і істинним місцем розташування. У радіонавігації характеристики точності зазвичай представлені як статистичні вимірювання системної помилки.

Неперервність – це здатність всієї системи виконувати свої функції без переривання і погіршення характеристик. Точніше кажучи, неперервність є ймовірністю того, що певні системні характеристики будуть виконані в процесі роботи, припускаючи що система була доступна на початку і прогнозується існування для всього періоду дії.

Доступність – це здатність системи забезпечувати необхідні функції і характеристики при проведенні наміреної операції. Доступність є індикація здатності системи забезпечити використовуваний сервіс на зазначеній зоні покриття. Доступність є загальною функцією фізичних характеристик навколишнього середовища і технічних можливостей передавача.

Цілісність – міра довіри, яка може бути віднесена до правильності інформації, що видається системою в цілому. Цілісність включає в себе здатність системи забезпечити користувача своєчасними і обґрунтованими попередженнями (спрацювання сигналізації).

Основні характеристики контролю цілісності – здатність виявити неприпустиме погіршення в роботі системи (для СНС це відмова супутника) із заданою вірогідністю і заданого часу затримки оповіщення (від моменту початку неправильного функціонування системи до моменту його виявлення).

Сплайн-функції оптимально підходять для вирішення задач інтерполяції даних (підрозділ 2.2, стор. 52). Загалом B -сплайн функції визначаються вузловими точками, тобто точками з'єднання сплайн-функції (підрозділ 2.4, стор. 64) та матрицею контрольних точок (підрозділ 2.3, стор. 56). Отже, за оціненою матрицею контрольних точок (2.16), побудованою за вхідними даними для певної групи параметрів, досить просто відновити втрачені дані шляхом інтерполяції у момент часу для якого дані відсутні. Причому це можливе як для одного параметра так і для всіх у межах групи.

Відповідно до підрозділу 2.1 інформація, щодо часових відліків втрачених даних є вхідною. Таким чином, у якості вхідних даних маємо матрицю разових команд справності певного параметру актуальну на певний проміжок часу. Для розрахунків будемо використовувати матрицю справності параметрів, що буде мати бінарний вигляд для k параметрів руху:

$$J = \begin{bmatrix} j_1(t) \\ j_2(t) \\ \vdots \\ j_k(t) \end{bmatrix}, \text{ де } t=[0, T]. \quad (2.18)$$

Зокрема, на рис. 2.7 у якості прикладу наведено часові відліки відсутніх даних у параметрі швидкості руху БПЛА, що позначено вертикальними лініями. Для даного польоту відсутні дані становили близько 35% від усіх наявних (відсутні 83 з 239 загальних спостережень).

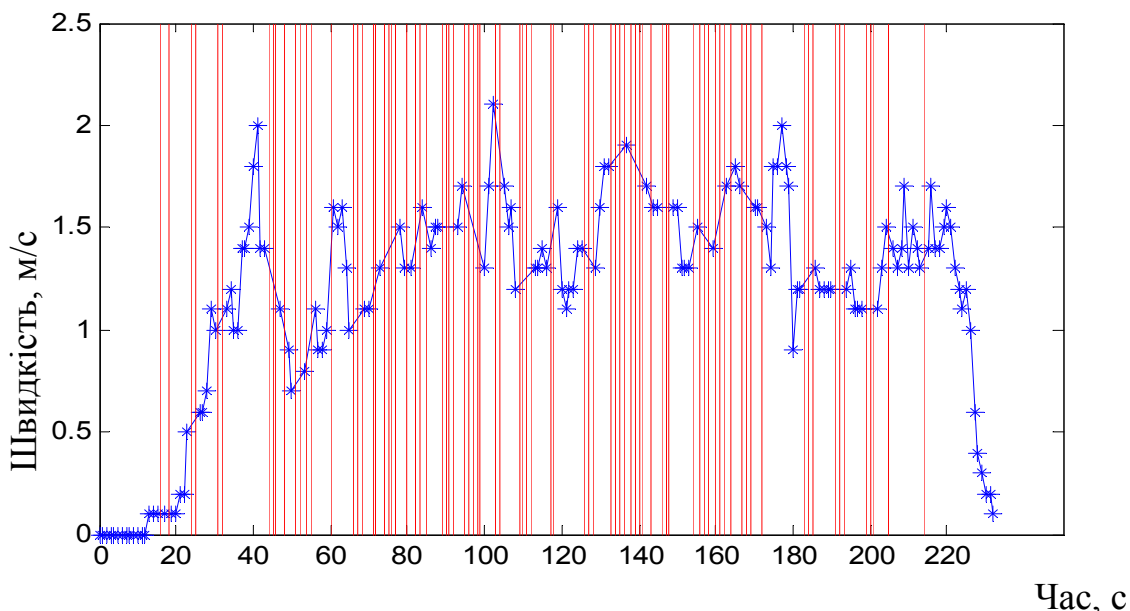


Рис. 2.7. Часові відліки відсутніх даних параметру швидкості руху БПЛА

Значення матриці справності параметрів заповнюються з таблиці разових команд для певного відліку часу:

$$j_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{у випадку справності} \\ 1, & \text{у випадку несправності} \end{cases}$$

Розрахунок втрачених даних будемо виконувати за загальною формулою для B -сплайнів (2.4) чи (2.7) у матричному вигляді з урахуванням матриці справності параметрів (2.18) наступного вигляду:

$$\bar{S}(t_i) = JX^T \bar{a}_i, \text{ де } i = \overline{1, n}. \quad (2.19)$$

Таким чином, вибір параметрів необхідних для відновлення виконується за допомогою матриці справності (2.18) на певний проміжок часу.

2.6. Виявлення аномальних значень результатів вимірювань параметрів

Причинами грубих похибок, що обумовлюють появу аномальних даних, можуть бути неконтрольовані зміни умов вимірювання, несправність

обладнання, випадкові імпульсні завади, помилки оператора та інші. Приклад аномальний даних у вимірах курсу БПЛА наведено на рис. 2.8.

Груба похибка (промах) – це похибка результату окремого вимірювання, що входить в ряд вимірювань, яка для даних умов різко відрізняється від інших результатів цього ряду.

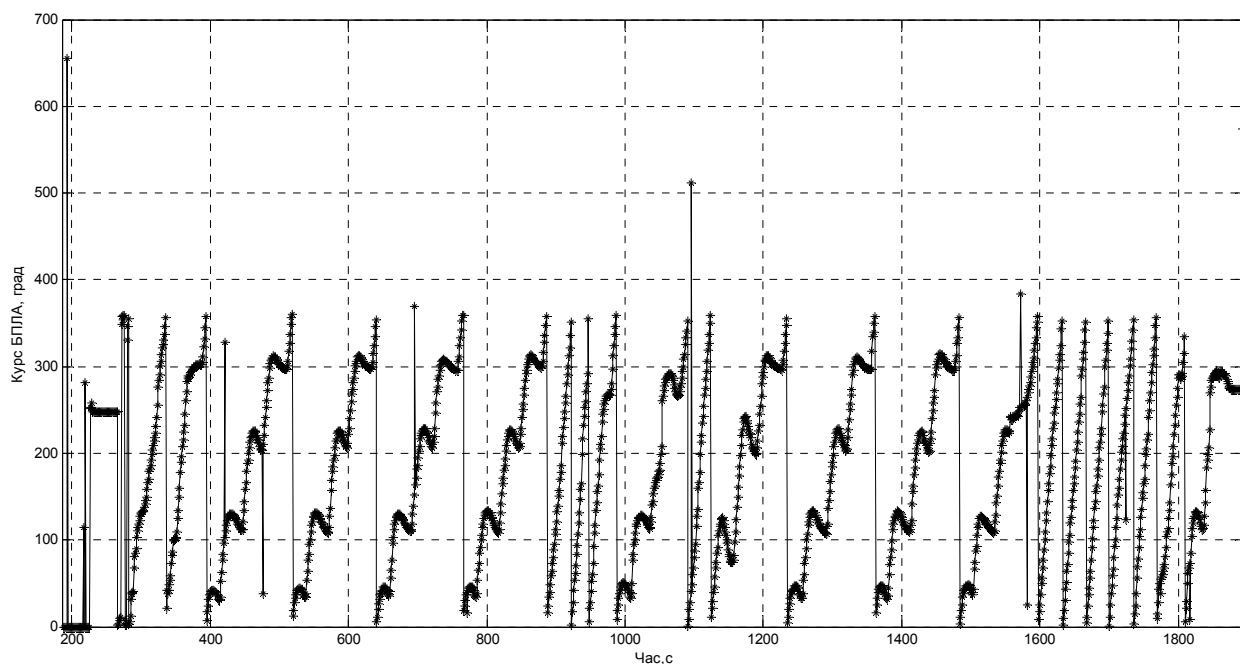


Рис. 2.8. Аномальні значення у вимірах курсу БПЛА

Для виключення грубих похибок використовують апарат перевірки статистичних гіпотез. Зокрема, для перевірки аномальних значень можуть бути використані наступні критерії [7, 37]:

- Ірвіна,
- Романовського,
- варіаційного розмаху,
- Анскомба,
- Діксона,
- трьох сигм,
- Смирнова,
- Шарльє,
- Шовене та інші.

Для достовірного визначення аномальних значень перевірку необхідно виконувати відразу по декільком критеріям. Рекомендується використовувати не менше трьох із них. Остаточне рішення про наявність аномальних даних приймається за більшістю критеріїв.

Критерій Ірвіна полягає у порівнянні розрахованого коефіцієнта λ з табличним значенням λ_q :

$$\lambda = \frac{(x_{n+1} - x_n)}{S},$$

де x_{n+1} x_n – найбільші значення випадкової величини;

S – середнє квадратичне відхилення.

Якщо $\lambda > \lambda_q$, то результат вимірювання помилковий або аномальний.

Критерій Романовського визначає наявність аномального значення, якщо виконується наступна нерівність:

$$|x_{аном} - \bar{X}_{ц.р.}| \geq t_p S,$$

де t_p – квантиль розподілу Стьюдента при заданій довірчій ймовірності з числом степенем вільності $k = n - kn$ (kn – число результатів спостережень для перевірки),

$x_{аном}$ – ймовірно аномальне значення,

$\bar{X}_{ц.р.}$ – центр розподілу вибірки,

S – середнє квадратичне відхилення.

Критерій варіаційного розмаху є одним з найпростіших методів виключення аномальних даних. Для його використання визначають розмах варіаційного ряду $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_k \leq \dots \leq x_n$ за формулою:

$$R_n = x_n - x_1.$$

Якщо будь-який член варіаційного ряду, наприклад x_k , різко відрізняється від всіх інших, то виконується перевірка з використанням наступної нерівності:

$$X - z \cdot R_n < x_k < X + z \cdot R_n,$$

де X – середнє арифметичне значення, розраховане після виключення ймовірного аномального значення;

z – критеріальне значення.

Якщо нерівність не виконується тоді значення є аномальним.

Критерій Анскомба застосовується ітеративно для часових рядів. Критерій виявляє поодинокі аномальні значення на основі їх відхилення від математичного сподівання ряду вимірювань. При цьому, виміри $\{x_{j1}, \dots, x_{jt}\}$ підпорядковані нормальному розподілу $N(\mu_j, \sigma_j^2)$, та отримуються послідовно через певний проміжок часу.

Результати вимірювань відповідно до досліджуваного параметра розбиваються на певні частини часового ряду j , для кожної з яких оцінюється математичне сподівання:

$$\mu_j = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_{jt}.$$

Потім оцінюються відхилення кожного спостереження від оціненого математичного сподівання:

$$z_{jt} = x_{jt} - \mu_j.$$

Дисперсія часового ряду σ_j^2 оцінюється за формулою:

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (x_{jt} - \mu_j)^2.$$

Аномально великим виміром вважається вимір m , що має найбільше значення z_{jm} , тобто:

$$z_{jm} = \max(z_j).$$

Для заданого коефіцієнту C , вимір m з найбільшим відхиленням від математичного сподівання вважається аномальним, якщо виконується умова:

$$|z_{jm}| > C \cdot \sigma_j.$$

Критерій Діксона засновується на припущенні, що похибки вимірювань мають нормальний закон розподілу.

При використанні критерію розраховується коефіцієнт Діксона [37] для перевірки найбільшого чи найменшого екстремального значення в залежності від кількості вимірювань. Критерій використовується, якщо вибірка може

містити більше одного аномального значення і потребує першочергового упорядкування результатів вимірювань. Розраховані по формулам значення коефіцієнта Діксона r порівнюється з табличним значенням критерію Діксона r_q .

Якщо $r > r_q$, то значення признається аномальним.

Критерій "3 σ " є одним із найпростіших для перевірки результатів, що мають нормальний закон розподілу.

Для вибірки розраховується центр розподілу і середнє квадратичне відхилення. Результат вважається аномальним, якщо виконується наступна нерівність:

$$x_{аном} - X_{ц.р.} \geq 3S.$$

Аналогічним цьому є критерій Райта, що засновується на тому, якщо залишкова похибка більша чотирьох сигм, то цей результат вимірювання є грубою похибкою.

Для реалізації критерію Смирнова розраховуються значення критерію, що спостерігається за формулою:

$$\beta = \frac{\max |x_{аном} - \bar{X}|}{\bar{S}}.$$

Розраховане значення порівнюється з критеріальним β_k з подальшим прийняттям рішення.

Критерій Шарльє застосовується для великих вибірок даних (більше 20). Гіпотеза про аномальність даних приймається, якщо виконується наступна умова:

$$|x_{аном} - X_{ц.р.}| > K_{Ш} S,$$

де $K_{Ш}$ – табличне значення критерію Шарльє.

Критерій Шовене полягає у визначенні числа очікуваних результатів спостережень $n_{оч}$, що мають такі ж вагомні похибки, як і ймовірні аномальні значення. Гіпотеза про наявність аномального значення приймається, якщо виконується умова:

$$n_{оч} \leq 0,5.$$

Спочатку розраховується середнє арифметичне значення X та середнє квадратичне відхилення S результатів спостережень. Далі, з таблиці нормованого нормального розподілу по величині :

$$z = \frac{|x_{аном} - X_{ц.п.}|}{S},$$

визначають ймовірність появи аномального значення в сукупності чисел n :

$$P(zS < |x_{аном} - X_{ц.п.}|).$$

Число очікуваних результатів $n_{оч}$ розраховується за формулою :

$$n_{оч} = n \cdot P.$$

Комп'ютерні програми, що реалізують наведені вище критерії пошуку аномальних даних у результатах вимірювань наведено у додатку А.3.

2.7. Оцінювання похибки відновлення даних

Знайдемо кореляційну матрицю $vec(\hat{X})$, що необхідна для знаходження кореляційної матриці $D\hat{S}(t)$, $0 \leq t \leq T$.

Використаємо співвідношення (2.13) до правої частини рівняння (2.15) матимемо:

$$vec(\bar{a}_i \bar{y}_i^T S_i^{-1}) = \left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right) vec(\bar{y}_i^T) = \left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right) \bar{y}_i. \quad (2.20)$$

Введемо позначення

$$U = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left((S_i^{-1})^T \otimes (\bar{a}_i \bar{a}_i^T) \right)}.$$

Тоді, рівняння (2.16) можна представити у наступному вигляді:

$$vec(X) = U \sum_{i=1}^n vec(\bar{a}_i \bar{y}_i^T S_i^{-1}).$$

Використаємо співвідношення (2.20):

$$vec(X) = U \sum_{i=1}^n \left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right) \bar{y}_i. \quad (2.21)$$

Кореляційне рівняння для $\text{vec}(X)$:

$$S_X = E(\text{vec}(X, \bar{\xi}))(\text{vec}(X, \bar{\xi}))^T.$$

З урахуванням (2.21) кореляційне рівняння для $\text{vec}(X)$:

$$S_X = E\left(U \sum_{i=1}^n \left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right) \bar{\xi} \right) \left(U \sum_{i=1}^n \left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right) \bar{\xi} \right)^T,$$

$$S_X = E\left[\sum_{i=1}^n \left(U \left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right) \bar{\xi} \right) \left(U \left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right) \bar{\xi} \right)^T \right],$$

$$S_X = E\left[\sum_{i=1}^n \left(U \left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right) \bar{\xi} U^T \left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right)^T \bar{\xi}^T \right) \right],$$

$$S_X = U U^T \sum_{i=1}^n \left(\left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right) \left(E \bar{\xi} \bar{\xi}^T \right) \left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right)^T \right).$$

З урахуванням (2.2) та (2.3) матимемо:

$$S_X = U U^T \sum_{i=1}^n \left(\left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right) \left(\sigma_0^2 S_i \right) \left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right)^T \right),$$

чи

$$S_X = \sigma_0^2 U U^T \sum_{i=1}^n \left(\left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right) S_i \left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right)^T \right). \quad (2.22)$$

Для оцінювання дисперсії одиниці ваги використаємо модель спостереження (2.1) з урахуванням (2.7) у наступному вигляді:

$$\bar{y}_i = X_0^T \bar{a} + \bar{\xi}_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2.23)$$

Загалом рівняння (2.23) є векторною лінійною моделлю регресії, в якій матриця X_0 є невідомою, що складається з $k(N+3)$ невідомих параметрів.

Тоді, незсунена оцінка дисперсії σ_0^2 розраховується як [33, стор. 100]:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{Q(\hat{X})}{n - k(N+3)}. \quad (2.24)$$

При цьому повинні виконуватися умови незсуненості :

$$E \hat{\sigma}^2 = \sigma_0^2, \quad (2.25)$$

та достатності результатів спостережень за параметром:

$$n > k(N+3). \quad (2.26)$$

У випадку виконання умов (2.25) та (2.26) кореляційна матриця для $\text{vec}(\hat{X})$ згідно із (2.22) може бути наближено оцінена, так:

$$S_X \approx \hat{S} = \hat{\sigma}^2 U U^T \sum_{i=1}^n \left(\left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right) S_i \left((S_i^{-1})^T \otimes \bar{a}_i \right)^T \right).$$

Слід зауважити, що при умовах, коли $\hat{\sigma}^2$ наближається до σ_0^2 та кількості вимірювань n , що наближається до нескінченості, матимемо імовірність, що наближається до 1. Це значить, що при великих n матриця \hat{S} справді гарно наближає $S_{\hat{X}}$.

Виконуємо оцінювання кореляційної матриці отриманих результатів (2.9). Для цього використаємо (2.10) з урахуванням (2.9), матимемо:

$$E\hat{S}(t) = \hat{X}_0^T \bar{a}(t). \quad (2.27)$$

Загалом кореляційна матриця $\hat{S}(t)$ може бути представлена наступним чином:

$$D\hat{S}(t) = E \left(\hat{S}(t) - E\hat{S}(t) \right) \times \left(\hat{S}(t) - E\hat{S}(t) \right)^T. \quad (2.28)$$

Враховуючи (2.9) та (2.27) кореляційна матриця (2.28) прийме наступний вигляд:

$$\begin{aligned} D\hat{S}(t) &= E \left(\hat{X}^T \bar{a}(t) - \hat{X}_0^T \bar{a}(t) \right) \times \left(\hat{X}^T \bar{a}(t) - \hat{X}_0^T \bar{a}(t) \right)^T, \\ D\hat{S}(t) &= E \bar{a}(t) \left(\hat{X}^T - \hat{X}_0^T \right) \times \left(\hat{X} - \hat{X}_0 \bar{a}(t) \right) \bar{a}(t)^T. \end{aligned} \quad (2.29)$$

У цьому випадку кореляційна матриця може бути обчислена шляхом наближення $S_{\hat{X}} \approx \hat{S}$. При цьому достатньою характеристикою тотожності є

$$\text{tr} D\hat{S}(t) = \sum_{j=1}^k D\hat{S}^{(j)}(t), \quad (2.30)$$

$$\text{де } \hat{S}(t) = \begin{bmatrix} \hat{S}^{(1)}(t) \\ \hat{S}^{(2)}(t) \\ \vdots \\ \hat{S}^{(k)}(t) \end{bmatrix}.$$

Тоді підставляючи (2.29) у (2.30) матимемо:

$$\text{tr} D\hat{S}(t) = E \text{tr} \left[\bar{a}(t) \left(\hat{X}^T - \hat{X}_0^T \right) \times \left(\hat{X} - \hat{X}_0 \bar{a}(t) \right) \bar{a}(t)^T \right],$$

$$trD\hat{S}(t) = Etr[\bar{a}(t)^T (\hat{X} - \hat{X}_0) \times (\hat{X}^T - \hat{X}_0^T) \bar{a}(t)]. \quad (2.31)$$

Оскільки під слідом матриці використовується скалярний добуток матриць тому (2.31) можливо представити у вигляді:

$$\begin{aligned} trD\hat{S}(t) &= E[\bar{a}(t)^T (\hat{X} - \hat{X}_0) \times (\hat{X}^T - \hat{X}_0^T) \bar{a}(t)], \\ trD\hat{S}(t) &= \bar{a}(t)^T E[(\hat{X} - \hat{X}_0) \times (\hat{X}^T - \hat{X}_0^T)] \bar{a}(t). \end{aligned} \quad (2.32)$$

Матриця $E[(\hat{X} - \hat{X}_0) \times (\hat{X}^T - \hat{X}_0^T)]$ може бути знайдена, виходячи з матриці $S_{\hat{X}}$.

Позначимо

$$Z = [(\hat{X} - \hat{X}_0) \times (\hat{X}^T - \hat{X}_0^T)], \quad (2.33)$$

де елементи квадратної матриці Z розміром $N+3$ розраховуються наступним чином:

$$z_{ij} = \sum_{p=1}^k (\hat{x}_{ip} - x_{0,ip}) (\hat{x}_{jp} - x_{0,jp}).$$

Тоді математичне сподівання:

$$Ez_{ij} = \sum_{p=1}^k E(\hat{x}_{ip} - x_{0,ip}) (\hat{x}_{jp} - x_{0,jp}). \quad (2.34)$$

Загалом (2.34) можливо представити з використанням коваріації матриць [33, стор. 24]:

$$Ez_{ij} = \sum_{p=1}^k \text{cov}(\hat{x}_{ip}, x_{ip}). \quad (2.35)$$

Вираз (2.35) є коваріацією оцінок, яка є певним матричним елементом великої матриці $S_{\hat{X}}$, складеної з потрібних коваріацій. Тоді, розв'язок (2.33) може бути отриманий з елементів (2.35):

$$E[(\hat{X} - \hat{X}_0) \times (\hat{X}^T - \hat{X}_0^T)] = E \begin{bmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \cdots & z_{1,N+3} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \cdots & z_{2,N+3} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{N+3,1} & z_{N+3,2} & \cdots & z_{N+3,N+3} \end{bmatrix}.$$

При обчисленні (2.32) користуємось наближенням $S_{\hat{X}} \approx \hat{S}$.

Величина (2.32) служить мірою якості сітки спостережень $\{t_1, \dots, t_n\}$.

У випадку, коли кореляція всередині кожного вектора $\bar{\xi}_i$ не змінюється з часом, можливо отримати оцінювання кореляційної матриці без кронекерівського добутку, що значно спростить обчислення. Припустимо, що

$$S_i = \sigma_i^2 S, \quad i \geq 1 \quad (2.36)$$

де $\sigma_i^2 > 0$ – відомі значення номінальних дисперсій; S – відома додатно визначена матриця. Тоді, з урахуванням (2.36) рівняння (2.12) можливо представити у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \bar{a}_i \bar{a}_i^T \hat{X} (\sigma_i^2 S)^{-1} &= \sum_{i=1}^n \bar{a}_i \bar{y}_i^T (\sigma_i^2 S)^{-1}, \\ \sum_{i=1}^n \bar{a}_i \bar{a}_i^T \hat{X} \sigma_i^{-2} S^{-1} &= \sum_{i=1}^n \bar{a}_i \bar{y}_i^T \sigma_i^{-2} S^{-1}, \\ S^{-1} \sum_{i=1}^n \hat{X} \bar{a}_i \bar{a}_i^T \sigma_i^{-2} &= S^{-1} \sum_{i=1}^n \bar{a}_i \bar{y}_i^T \sigma_i^{-2}, \\ \sum_{i=1}^n \hat{X} \frac{\bar{a}_i \bar{a}_i^T}{\sigma_i^2} &= \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{y}_i^T}{\sigma_i^2}, \\ \hat{X} &= \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{y}_i^T}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{a}_i^T}{\sigma_i^2}}. \end{aligned} \quad (2.37)$$

Тоді, (2.9) з урахуванням (2.37) можливо представити у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \hat{S}(t) = \hat{X}^T \bar{a}(t) &= \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{y}_i^T}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{a}_i^T}{\sigma_i^2}} \right]^T \bar{a}(t), \\ \hat{S}(t) &= \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i^T \bar{y}_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{a}_i^T}{\sigma_i^2}} \right] \bar{a}(t). \end{aligned}$$

Кореляційну матрицю (2.28) аналогічно до (2.29) можна представити у вигляді:

$$D\hat{S}(t) = E \left[\left(\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i^T \bar{\xi}_i}{\sigma_i^2} \\ \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{a}_i^T}{\sigma_i^2} \end{bmatrix} \bar{a}(t) \right) \times \left(\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i^T \bar{\xi}_i}{\sigma_i^2} \\ \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{a}_i^T}{\sigma_i^2} \end{bmatrix} \bar{a}(t) \right)^T \right],$$

$$D\hat{S}(t) = E \left[\left(\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i^T \bar{\xi}_i}{\sigma_i^2} \\ \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{a}_i^T}{\sigma_i^2} \end{bmatrix} \bar{a}(t) \right) \times \left(\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{\xi}_i^T}{\sigma_i^2} \\ \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{a}_i^T}{\sigma_i^2} \end{bmatrix} \bar{a}(t)^T \right) \right]. \quad (2.38)$$

Позначимо:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{a}_i^T}{\sigma_i^2}.$$

Тоді аналогічно до (2.31) вираз (2.38) прийме наступний вигляд:

$$tr D\hat{S}(t) = tr E \left[\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{\xi}_i^T}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i^T \bar{\xi}_i}{\sigma_i^2} \right] \left[(\bar{a}(t)\Phi^{-1}) \times (\bar{a}^T(t)\Phi^{-1}) \right]. \quad (2.39)$$

Внаслідок незалежності векторів \bar{E}_i маємо:

$$E \left[\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{\xi}_i^T}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i^T \bar{\xi}_i}{\sigma_i^2} \right] = E \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{\xi}_i^T \bar{a}_i^T \bar{\xi}_i}{\sigma_i^4} = E \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{a}_i^T}{\sigma_i^4} (\bar{\xi}_i^T \bar{\xi}_i) = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{a}_i^T}{\sigma_i^4} tr D\bar{\xi}_i,$$

$$E \left[\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{\xi}_i^T}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i^T \bar{\xi}_i}{\sigma_i^2} \right] = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{a}_i^T}{\sigma_i^4} \sigma_0^2 \sigma_i^2 tr S = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{a}_i^T}{\sigma_i^2} \sigma_0^2 tr S = \Phi \sigma_0^2 tr S.$$

Підставимо отриманий вираз у (2.39) матимемо:

$$tr D\hat{S}(t) = \sigma_0^2 tr Str \Phi \left[(\bar{a}(t)\Phi^{-1}) \times (\bar{a}^T(t)\Phi^{-1}) \right] = \sigma_0^2 tr S \bar{a}(t) \bar{a}^T(t) \Phi^{-1}. \quad (2.40)$$

Величина незсунена оцінка дисперсії σ_0^2 розраховується за формулою (2.24):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{Q(\hat{X})}{n-k(N+3)} = \frac{1}{n-k(N+3)} \sum_{i=1}^n \frac{S^{-1}(\bar{y}_i - X^T \bar{a}_i)^T \times (\bar{y}_i - X^T \bar{a}_i)}{\sigma_i^2}. \quad (2.41)$$

Тоді, похибка оцінювання виходячи з (2.39) можна представити у наступному вигляді:

$$D\hat{S}(t) = E \left[\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{\xi}_i^T}{\sigma_i^2} \left[\Phi^{-1} \bar{a}(t) \bar{a}^T(t) \Phi^{-1} \right] \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i^T \bar{\xi}_i}{\sigma_i^2} \right]. \quad (2.42)$$

Введемо позначення:

$$w = \Phi^{-1} \bar{a}(t) \bar{a}^T(t) \Phi^{-1}.$$

Тоді, (2.42) представимо у вигляді:

$$D\hat{S}(t) = E \left[\sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{\xi}_i^T}{\sigma_i^2} w \sum_{i=1}^n \frac{\bar{a}_i^T \bar{\xi}_i}{\sigma_i^2} \right] = E \left[\sum_{i,j=1}^n \frac{\bar{a}_i \bar{\xi}_i^T w \bar{a}_j^T \bar{\xi}_j}{\sigma_i^2 \sigma_j^2} \right] = \sum_{i,j=1}^n \frac{\bar{a}_i w \bar{a}_j^T E(\bar{\xi}_i^T \bar{\xi}_j)}{\sigma_i^2 \sigma_j^2}.$$

Враховуючи, що

$$E \bar{\xi}_i^T \bar{\xi}_j = \sigma_0^2 S_i \sigma_i^2 \sigma_j^2,$$

тоді

$$D\hat{S}(t) = \sum_{i=1}^n \bar{a}_i w \bar{a}_j^T \sigma_0^2 S_i = \sigma_0^2 \sum_{i=1}^n \bar{a}_i w \bar{a}_j^T S_i. \quad (2.43)$$

2.8. Оцінювання довірчого інтервалу до відновлених польотних даних

Важливим етапом оцінювання значень втрачених параметрів є побудова довірчих інтервалів, що дають змогу оцінити точність відновлення даних за запропонованим методом. Для побудови довірчих інтервалів будемо використовувати не всі значення параметрів, а деякі з них, що характеризують задані умови польоту. Для цього введемо прямокутну матрицю P , що буде вирізати необхідні значення параметрів з результатів відновлення:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}.$$

Тоді, результати відновлення (2.9) представимо з використанням матриці P :

$$P\hat{S}(t) = P\hat{X}^T \bar{a}(t). \quad (2.44)$$

Математичне сподівання від (2.44) відповідатиме істинним значенням:

$$EP\hat{S}(t) = P\bar{S}_0(t). \quad (2.45)$$

Дисперсія оцінених значень для вирізаних параметрів (2.44) матиме вигляд:

$$DP\hat{S}(t) = D(P\hat{X}^T \bar{a}(t)). \quad (2.46)$$

Оскільки матриця P є діагональною, то рівняння (2.46) можна представити у векторизованому вигляді:

$$DP\hat{S}(t) = D(\text{vec}(P\hat{X}^T \vec{a}(t))).$$

Використаємо властивість (2.13) для векторизованого добутку матриць:

$$\begin{aligned} DP\hat{S}(t) &= D((\vec{a}(t)^T \otimes P)\text{vec}(\hat{X}^T)), \\ DP\hat{S}(t) &= D(\vec{a}(t)^T \otimes P)D(\text{vec}(\hat{X}^T)). \end{aligned} \quad (2.47)$$

Для розв'язку (2.47) знайдемо значення дисперсії для $\text{vec}(\hat{X}^T)$. Для цього скористаємось рівнянням (2.12). Транспонуємо рівняння (2.12) виведемо значення для $\text{vec}(\hat{X}^T)$:

$$\begin{aligned} \left(\sum_{i=1}^n \vec{a}_i \vec{a}_i^T X S_i^{-1} \right)^T &= \left(\sum_{i=1}^n \vec{a}_i \vec{y}_i^T S_i^{-1} \right)^T, \\ \sum_{i=1}^n \vec{a}_i \vec{a}_i^T X^T S_i^{-1} &= \sum_{i=1}^n \vec{a}_i^T \vec{y}_i S_i^{-1}, \\ \sum_{i=1}^n S_i^{-1} X^T \vec{a}_i \vec{a}_i^T &= \sum_{i=1}^n S_i^{-1} \vec{y}_i \vec{a}_i^T, \\ \text{vec} \left(\sum_{i=1}^n S_i^{-1} X^T \vec{a}_i \vec{a}_i^T \right) &= \text{vec} \left(\sum_{i=1}^n S_i^{-1} \vec{y}_i \vec{a}_i^T \right), \\ \sum_{i=1}^n \text{vec} (S_i^{-1} X^T \vec{a}_i \vec{a}_i^T) &= \sum_{i=1}^n \text{vec} (S_i^{-1} \vec{y}_i \vec{a}_i^T). \end{aligned}$$

Використаємо властивість векторизованого добутку матриць (2.13):

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n [((\vec{a}_i \vec{a}_i^T) \otimes S_i^{-1}) \text{vec}(X^T)] &= \sum_{i=1}^n [(\vec{a}_i \otimes S_i^{-1}) \text{vec}(\vec{y}_i)], \\ \text{vec}(X^T) \sum_{i=1}^n [((\vec{a}_i \vec{a}_i^T) \otimes S_i^{-1})] &= \sum_{i=1}^n [(\vec{a}_i \otimes S_i^{-1}) \text{vec}(\vec{y}_i)], \\ \text{vec}(X^T) &= \frac{\sum_{i=1}^n [(\vec{a}_i \otimes S_i^{-1}) \text{vec}(\vec{y}_i)]}{\sum_{i=1}^n [((\vec{a}_i \vec{a}_i^T) \otimes S_i^{-1})]}. \end{aligned}$$

Знайдемо дисперсію $\text{vec}(\hat{X}^T)$, матимемо:

$$D\text{vec}(X^T) = E \left(\frac{\sum_{i=1}^n [(\vec{a}_i \otimes S_i^{-1}) \vec{\xi}_i]}{\sum_{i=1}^n [((\vec{a}_i \vec{a}_i^T) \otimes S_i^{-1})]} \right) \left(\frac{\sum_{i=1}^n [(\vec{a}_i \otimes S_i^{-1}) \vec{\xi}_i]}{\sum_{i=1}^n [((\vec{a}_i \vec{a}_i^T) \otimes S_i^{-1})]} \right)^T,$$

$$\begin{aligned}
Dvec(X^T) &= \frac{\sum_{i=1}^n E\left[\left(\bar{a}_i \otimes S_i^{-1}\right) \bar{\xi}_i \left[\left(\bar{a}_i \otimes S_i^{-1}\right) \bar{\xi}_i\right]^T\right]}{\left(\sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{a}_i \bar{a}_i^T\right) \otimes S_i^{-1}\right]\right) \left(\sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{a}_i \bar{a}_i^T\right) \otimes S_i^{-1}\right]\right)^T}, \\
Dvec(X^T) &= \frac{\sum_{i=1}^n E\left(\bar{a}_i \otimes S_i^{-1}\right) \bar{\xi}_i \left(\bar{a}_i \otimes S_i^{-1}\right)^T \bar{\xi}_i^T}{\left(\sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{a}_i \bar{a}_i^T\right) \otimes S_i^{-1}\right]\right) \left(\sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{a}_i \bar{a}_i^T\right) \otimes S_i^{-1}\right]\right)^T}, \\
Dvec(X^T) &= \frac{\sum_{i=1}^n \left(\bar{a}_i \otimes S_i^{-1}\right) \left(E \bar{\xi}_i \bar{\xi}_i^T\right) \left(\bar{a}_i \otimes S_i^{-1}\right)^T}{\left(\sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{a}_i \bar{a}_i^T\right) \otimes S_i^{-1}\right]\right) \left(\sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{a}_i \bar{a}_i^T\right) \otimes S_i^{-1}\right]\right)^T}.
\end{aligned}$$

Враховуючи (2.2) та (2.3) матимемо:

$$\begin{aligned}
Dvec(X^T) &= \frac{\sum_{i=1}^n \left(\bar{a}_i \otimes S_i^{-1}\right) \left(\sigma_0^2 S_i\right) \left(\bar{a}_i \otimes S_i^{-1}\right)^T}{\left(\sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{a}_i \bar{a}_i^T\right) \otimes S_i^{-1}\right]\right) \left(\sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{a}_i \bar{a}_i^T\right) \otimes S_i^{-1}\right]\right)^T}, \\
Dvec(X^T) &= \sigma_0^2 \frac{\sum_{i=1}^n \left(\bar{a}_i \otimes S_i^{-1}\right) S_i \left(\bar{a}_i \otimes S_i^{-1}\right)^T}{\left(\sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{a}_i \bar{a}_i^T\right) \otimes S_i^{-1}\right]\right) \left(\sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{a}_i \bar{a}_i^T\right) \otimes S_i^{-1}\right]\right)^T}.
\end{aligned}$$

Для спрощення введемо позначення:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\bar{a}_i \otimes S_i^{-1}\right) S_i \left(\bar{a}_i \otimes S_i^{-1}\right)^T}{\left(\sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{a}_i \bar{a}_i^T\right) \otimes S_i^{-1}\right]\right) \left(\sum_{i=1}^n \left[\left(\bar{a}_i \bar{a}_i^T\right) \otimes S_i^{-1}\right]\right)^T}.$$

Тоді,

$$Dvec(X^T) = \sigma_0^2 H. \quad (2.48)$$

Представимо (2.47) з урахуванням (2.48):

$$DP\hat{S}(t) = \left(\bar{a}(t)^T \otimes P\right) \left(\sigma_0^2 H\right) \left(\bar{a}(t)^T \otimes P\right)^T,$$

$$DP\hat{S}(t) = \sigma_0^2 \left(\bar{a}(t)^T \otimes P\right) H \left(\bar{a}(t)^T \otimes P\right)^T.$$

Для спрощення введемо позначення:

$$\Phi = \left(\bar{a}(t)^T \otimes P\right) H \left(\bar{a}(t)^T \otimes P\right)^T.$$

Тоді матимемо:

$$DP\hat{S}(t) = \sigma_0^2 \Phi. \quad (2.49)$$

Припустимо, що похибки для $P\hat{S}(t)$ мають нормальний розподіл з математичним сподіванням (2.45) та дисперсією (2.49). Тоді, з (2.49) матимемо:

$$\sigma_0^2 = \Phi^{-1} DP\hat{S}(t). \quad (2.50)$$

Крім того, врахуємо, що дисперсія є різницею між певним значенням та математичним сподіванням цієї величини піднесеної до другого степеню, чи у випадку матриць, матимемо скалярний добуток (аналогічно до (2.27)), тобто:

$$DP\hat{S}(t) = E\left(P\hat{S}(t) - EP\hat{S}(t)\right) \times \left(P\hat{S}(t) - EP\hat{S}(t)\right)^T.$$

Врахуємо (2.46), матимемо

$$DP\hat{S}(t) = E\left(P\hat{S}(t) - P\bar{S}_0(t)\right) \times \left(P\hat{S}(t) - P\bar{S}_0(t)\right)^T.$$

З урахуванням (2.50) матимемо:

$$\hat{Z} = \Phi^{-1} E\left(P\hat{S}(t) - P\bar{S}_0(t)\right) \times \left(P\hat{S}(t) - P\bar{S}_0(t)\right)^T. \quad (2.51)$$

Можна стверджувати, що

$$\hat{Z} \sim \sigma_0^2 \chi_{k_1}^2. \quad (2.52)$$

Використаємо розподіл Фішера $F_{k_1, m}$ з k_1 та m степенями вільності. Для цього використаємо оцінку (2.24) та її розподіл:

$$\hat{\sigma}^2 \sim \frac{\sigma_0^2 \chi_m^2}{m}, \text{ де } m = n - k(N+3) > 0. \quad (2.53)$$

Отже, знайшовши відношення (2.52) до (2.53) можна представити результат у вигляді розподілу Фішера, враховуючи при цьому стохастичну незалежність \hat{Z} від $\hat{\sigma}^2$ [32, стор. 97], матимемо:

$$\frac{\hat{Z}}{k_1} \sim \frac{\sigma_0^2 \chi_{k_1}^2}{k_1}, \quad \frac{\hat{Z}/k_1}{\hat{\sigma}^2} \sim \frac{\sigma_0^2 \chi_{k_1}^2 / k_1}{\sigma_0^2 \chi_m^2 / m}, \quad \frac{\hat{Z}/k_1}{\hat{\sigma}^2} \sim \frac{\chi_{k_1}^2 / k_1}{\chi_m^2 / m} = F_{k_1, m}. \quad (2.54)$$

При цьому,

$$\chi_m^2 \sim \sum_{i=1}^m \gamma_i^2,$$

де $\gamma_1, \dots, \gamma_m$ – незалежні стандартні Гаусівські величини.

Тоді, довірчий інтервал для істинних значень $P\bar{S}_0(t)$ з урахуванням (2.54) буде мати наступний вигляд:

$$E = \left\{ P\bar{S}_0(t) \in \mathfrak{R}^{k_1} : \frac{\hat{Z}}{k_1 \hat{\sigma}^2} \leq F_{k_1, m}^\alpha \right\}, \quad (2.55)$$

де $1-\alpha$ – довірна ймовірність; $F_{k_1, m}^\alpha$ – квантиль розподілу Фішера [87].

Для квантиля розподілу Фішера виконується :

$$P\{F_{k_1, m} > F_{k_1, m}^\alpha\} = \alpha.$$

Тобто, ймовірність того, що випадкова величина з розподілу Фішера $F_{k_1, m}$, з k_1 та m степенями вільності, буде більша за квантиль $F_{k_1, m}^\alpha$ дорівнює α . Оскільки відхиленням від запланованої траєкторії руху вважається відхилення за межі похибок системи позиціонування БПЛА, тоді правильному виконанню польотного завдання відповідатиме знаходження (2.45) у межах похибок датчиків. Тоді, ймовірність знаходження БПЛА на запланованій траєкторії руху за групою параметрів можна оцінити за граничним значенням (2.55):

$$\frac{\hat{Z}}{k_1 \hat{\sigma}^2} = F_{k_1, m}^\alpha, \quad (2.56)$$

для цього виконаємо зворотне обчислення ймовірності за відомими степенями вільності та значенням квантелю розподілу Фішера (обчисленому за (2.56)) у наступному вигляді [87, стор. 946]:

$$\alpha = \frac{k_1^{0.5k_1} m^{0.5m}}{B(0.5k_1, 0.5m)} \frac{\frac{\hat{Z}}{k_1 \hat{\sigma}^2}}{\int_0^1 t^{0.5(k_1-2)} (m + k_1 t)^{-0.5(k_1+m)} dt}, \quad \frac{\hat{Z}}{k_1 \hat{\sigma}^2} \geq 0, \quad (2.57)$$

де $B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1} (1-t)^{y-1} dt$ – Бета функція [87, стор.258]

Оцінена за (2.57) ймовірність відповідатиме ймовірності знаходження БПЛА на заданій траєкторії руху, а обернена – ймовірності втрати запланованої траєкторії.

Висновки до розділу 2

1. Запропоновано новий метод багатопараметричного відновлення польотних даних, відмінність якого полягає у використанні наявних параметрів польоту та їх попередніх вимірів для заповнення пропусків даних чи коригування аномальних значень та враховує похибки вимірювального обладнання. У якості базисної функції запропоновано використовувати кубічні B -сплайни.
2. Виконано аналіз існуючих функцій, що можуть бути застосовані у якості базисних функцій сплайну, за результатами якого обґрунтовано доцільність використання B -сплайнів для вирішення поставленої задачі, що дозволяє гарантувати відновлення даних з необхідним ступенем гладкості та неперервності.
3. Виведено математичну залежність для розрахунку матриці коефіцієнтів B -сплайнів за певною кількістю використовуваних параметрів (2.16), що враховує похибки вимірювального обладнання та мінімізує загальну похибку відновлення даних.
4. Запропоновано математичну залежність (2.19) для оцінювання втрачених даних за допомогою B -сплайнів з визначенням наявності втрачених даних за матрицею справності параметрів (2.18) від бортової системи реєстрації даних.
5. Досліджено проблему наявності аномальних даних у результатах вимірювання польотної інформації. Запропоновано комплексне використання розглянутих критеріїв для достовірного прийняття рішення про аномальність даних. Виключення аномальних даних з результатів вимірювань дозволить підвищити точність відновлення польотної інформації.
6. Виконано оцінювання похибок відновлення пропусків даних за формулою (2.32) та виведено відповідну математичну залежність (2.43) для випадку постійних корельованих похибок, розрахунок якої дозволить оцінювати точність відновлення втрачених даних.

7. Проаналізовано різні методи вибору вузлових точок для B -сплайну. Кожний з наведених методів підходить до відновлення певного типу даних та показує найкращі результати в залежності від динамічності вхідних даних. За результатами аналізу, у якості базового методу запропоновано використовувати універсальну формулу (2.17) для обробки різних типів даних.
8. Виведено математичну залежність (2.57) для оцінювання ймовірності виходу відновлених значень параметрів БАС на проміжках втраченої інформації за межі похибок датчиків. Тобто, ймовірності відхилення від запланованої траєкторії руху.

РОЗДІЛ 3

БАГАТОАЛЬТЕРНАТИВНА КЛАСИФІКАЦІЯ ПОЛЬОТНИХ СИТУАЦІЙ БПЛА

3.1. Формалізація польотних ситуацій

Відсутність на борту пілота БАС вводить нові особливості виконання обов'язків пов'язаних із забезпеченням безпеки польотів, які передбачають впровадження технічних засобів виявлення і попередження небезпечних ситуацій, управління та контролю, забезпечення зв'язку з органом ОПР і запобігання ненавмисного або незаконного втручання.

Безпека це стан, при якому можливість заподіяння шкоди особам або майну знижена до прийняттого рівня і підтримується на цьому або нижчому рівні за допомогою постійного процесу виявлення факторів небезпеки та управління факторами ризику для безпеки польотів.

Чим більше в системі закладено вбудованих засобів захисту і рівнів стримування і чим ефективніше вони працюють, тим більше існує можливостей контролювати наслідки експлуатаційних помилок.

Літальний апарат, що виконує політ без пілота на борту, породжує широкий спектр джерел небезпеки для цивільної авіаційної системи. Ці джерела небезпеки необхідно ідентифікувати і знизити загрози для безпеки польотів.

У безпечній системі слід допускати наявність факторів ризику для безпеки польотів, що виникають як наслідок факторів небезпеки в експлуатаційному контексті. Доки фактори ризику для безпеки польотів та експлуатаційні помилки знаходяться під контролем в розумних межах, така динамічна система вважається безпечною. Іншими словами, фактори ризику для безпеки польотів та експлуатаційні помилки, що знаходяться під контролем в розумних межах, припустимі в безпечній по своїй суті системі. Тому, безпека розглядається як стан контрольованого ризику для безпеки польотів.

З цього можна зробити висновок, що справа забезпечення відмовостійкості в сфері безпеки польотів полягає не в безпомилковій експлуатаційній діяльності, а скоріше в ефективному управлінні експлуатаційними помилками. Аналіз безпеки польотів ґрунтується на фактичній інформації, що надходить з декількох джерел. Необхідно забезпечити збір, класифікацію і збереження даних, що відносяться до предмету аналізу.

Оцінка факторів ризику визначає умови виконання польоту, що в свою чергу потребує класифікації польотних ситуацій. До основних факторів що безпосередньо впливають на перебіг нормального польоту можна віднести конструкцію БАС, людський фактор та функціонування БАС.

Конструкція БАС включає всі елементи, які є частиною самого БПЛА та будь-які зовнішні системи, які беруть участь в управлінні польотом.

КІО має вирішальне значення для експлуатації БАС. При експлуатації БАС розглядаються три основні типи радіозв'язку між БПЛА та НСК: КІО для забезпечення управління польотом; КІО для передачі телеметрії та стану БПЛА у тому числі й інформації стосовно небезпек; КІО для контролю та управління обладнанням корисного навантаження.

У пілотованій авіації пілот завжди має змогу керувати літаком. У порівнянні з цим, в БАС, управління може бути втраченим, залишивши оператора БПЛА поза керуванням. Крім того, радіоканал передачі даних уразливий до перебоїв, затримки та спотворення даних. Так, наприклад часті переривання зв'язку при управлінні польотом є прогнозованою подією.

Наявні засоби покращення КІО здатні забезпечити тільки тимчасові заходи безпеки у кращому випадку і, як результат, довготривала втрата КІО може привести до повної втрати контролю над БПЛА.

НСК теж розглядається як джерело загроз для оператора та вдалого виконання польотного завдання, при цьому рівень ризику для вдалого виконання польоту в більшій частині залежить від рівня автономності обладнання БПЛА. Крім того, певні події несуть загрози виключно направлені

на НСК та не стосуються функціонування БПЛА(наприклад землетруси або торнадо).

Ризики БАС повинні враховувати потенційну взаємодію між обладнанням БПЛА та його корисним навантаженням. Корисне навантаження та критичні системи БПЛА можуть мати спільні системи електроживлення та охолодження, тому необхідно враховувати можливі негаразди, що можуть трапитись з корисним навантаженням для попередження негативної дії на системи БПЛА. У певних випадках корисне навантаження має дуже високий рівень функціональної інтеграції з системами БПЛА, що створює передумови до виникнення нових факторів впливу. Крім того, певне обладнання корисного навантаження може бути використане для підвищення рівня безпеки польоту шляхом дублювання польотної інформації.

Особлива увага в оцінці безпеки відводиться оцінюванню людського чиннику, оскільки, до складу типової БАС входять оператори керування та обслуговування корисного навантаження та обслуговуючий персонал. У випадку БПЛА розмежування оператора та БПЛА вводить ряд нових факторів, що впливають на безпеку руху та висувають специфічні вимоги до професійної підготовки. Зокрема, необхідно враховувати психо-фізичну завантаженість оператора в залежності від складності польотного завдання.

Іншим вагомим фактором є зниження ситуаційної обізнаності оператора у порівнянні з пілотом літака. Пілот на борту літака може використовувати фізичні відчуття, такі як зір, нюх, дотик задля виявлення певних небезпечних ситуацій. Оператор БПЛА має обмеження до подібних відчуттів, що матиме невідомий вплив на здатність виявляти деякі небезпечні ситуації, такі як відмови устаткування, пожежа, дим, вібрації, що є результатом поганих метеоумов. Також необхідно враховувати, що оператор БПЛА виконує керування з певною затримкою на основі даних отриманих у минулий проміжок часу. Це створює певні небезпеки, вирішення яких є непростою задачею. Ситуаційна обізнаність оператора є ключем до здатності правильного

прийняття рішення. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є широке використання автоматизованих алгоритмів.

Середовище функціонування БАС теж вносить свій вплив на безпеку руху. Сучасний повітряний простір є динамічно змінюванюваним з численними рухомими об'єктами.

Головним серед цих проблем є можливість виявлення і уникнення зіткнень з перешкодами, що дозволяє виявляти об'єкти повітряного руху, небезпечні метеорологічні утворення, рельєф місцевості [70, 75], та інші перешкоди та здійснювати маневрування навколо них [4, 72, 88].

Наземні операції з використанням БПЛА теж несуть високий ризик безпеки оскільки в багатьох випадках оператор БПЛА є відповідальним за процедури передпольотної підготовки такі як запуск та зліт. Вони виникають, оскільки у більшості випадків оператор не має прямого візуального контакту з рухом на земній поверхні, що в свою чергу може створити небезпечні ситуації зближення з рельєфом місцевості або завдати шкоду обслуговуючому персоналу.

У загальному випадку класифікація польотних ситуацій може ґрунтуватися на величині впливу на перебіг людського життя, матеріальними затратами чи впливом на навколишнє середовище [95, 97] (табл. 3.1.).

Таблиця 3.1 – Серйозність наслідків дії факторів ризику та їх вплив

Клас ситуації	Рівень серйозності наслідків	Вплив на людей	Вплив на матеріальні затрати, млн. дол.	Вплив на навколишнє середовище
КС	А	смерть, втрата працездатності	> 1	значний
АС	В	важка травма, постійна чи часткова інвалідність, госпіталізація багатьох людей	0.2 – 1	відчутний
СС	С	незначні травми	0.01 – 0.2	незначний
УУП	Д	легкі травми	< 0.01	незначний

Дія кожного з небезпечних факторів оцінюється за допомогою ризиків та формують кількісну характеристику кожної з ситуацій польоту БПЛА. У табл. 3.2. наведені основні межі безпеки польоту відповідно до класу ситуації та типу БПЛА [60].

Таблиця 3.2 – Межі безпеки польоту відповідно до класу ситуації та типу БПЛА

Клас БПЛА	УУП	СС	АС	КС
I	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
II	10^{-3}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
III	10^{-3}	10^{-5}	10^{-7}	10^{-8}
IV	10^{-3}	10^{-5}	10^{-7}	10^{-9}

Оцінювання величини ризику ґрунтується на найбільш вагомих результатах, які можна очікувати. Загалом, ризики можливо характеризувати відповідно до рівня небезпек потенційного впливу на людей, майно та навколишнє середовище та залежать від ймовірності їх виникнення протягом функціонування БАС (табл. 3.3.) [95].

Таблиця 3.3 – Характеристика ймовірностей виникнення факторів ризику

Характеристика ймовірності виникнення	Рівень	Кількість аварій за 100 тис. польотних годин	Частота появи
Часті	5	100 чи більше	Можуть відбуватися багаторазово
Періодичні	4	10 до 99	Можуть відбуватися час від часу
Можливі	3	1 до 9.9	Мала ймовірність, але можуть відбуватися
Малоймовірні	2	0.1 до 0.99	Дуже мала ймовірність події
Практично неможливі	1	менше 0.1	Можливість настання події практично виключена

Кожна з можливих потенційних небезпек має бути проаналізована та оцінена ймовірність її появи та рівень впливу на польотну ситуацію. Для розподілу пріоритетів у боротьбі з ризиками при управлінні безпекою застосовують матрицю оцінки факторів ризиків, що наведено у табл. 3.4. [95].

Таблиця 3.4 – Матриця оцінки факторів ризику для безпеки польотів

Ймовірність виникнення	Серйозність наслідків				
	A (КС)	B (АС)	C (СС)	D (УУП)	E (НС)
5 – часті	5A	5B	5C	5D	5E
4 – періодичні	4A	4B	4C	4D	4E
3 – можливі	3A	3B	3C	3D	3E
2 – малоймовірні	2A	2B	2C	2D	2E
1 – практично неможливі	1A	1B	1C	1D	1E

За оціненими значеннями ймовірності і серйозності оцінюють прийнятність наслідків небезпеки (наведено у табл. 3.5.).

Таблиця 3.5 – Матриця прийнятності факторів ризику для безпеки польотів

Індекс ризику	Характеристика рівня ризику
5A, 5B, 5C, 4A, 4B, 3A	Неприйнятний в існуючих умовах
5D, 4E, 4C, 3B, 3C, 2A, 2B	Необхідний контроль рівня ризику та організаційні заходи, спрямовані на його зниження
4D, 4E, 3D, 2C, 1A, 1B	Прийнятний після перегляду експлуатаційних умов
3E, 2D, 2E, 1C, 1D, 1E	Прийнятний

Оцінка факторів ризику для безпеки польотів, пов'язаних з наслідками факторів небезпеки, дозволяє прийняти обгрунтоване рішення про те, чи можливо взяти під контроль фактори ризику для безпеки польотів і тим самим продовжити виконання польотного завдання. Якщо ризик не задовольняє заздалегідь встановленим критеріям прийнятності, то варто спробувати зменшити його до прийняттого рівня або, якщо це не можливо здійснити, до найменшого можливого рівня, використовуючи відповідні процедури щодо його зниження.

Враховуючи відмінності безпілотної авіації від пілотованої, а також складність та особливості виконання польотного завдання, доцільно модифікувати наявні польотні ситуації для БАС.

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

На рис. 3.1 наведено схему розвитку польотних ситуацій. Слід також відмітити, що ускладнення ситуації визначається послідовністю дій. Попередня дія по відношенню до наступної розглядається як причина.

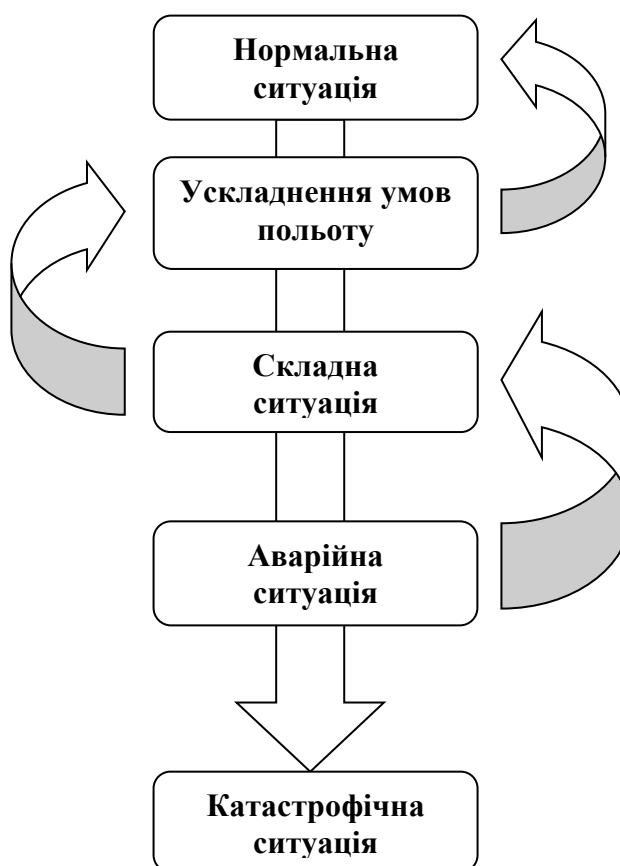


Рис. 3.1. Схема розвитку польотних ситуацій

При *нормальній ситуації* надзвичайно мізерні відхилення від вимог виконання польотного завдання ніяк не впливають на успішність його виконання та знаходяться в допустимих межах похибок вимірювального

обладнання. Польотне завдання виконується відповідно до вимог безпеки та знаходиться під постійним контролем.

Ситуацію ускладнення умов польоту доцільно визначити мізерними відхиленням від вимог виконання польотного завдання. Відхилення значень параметрів від запланованих дозволяють системі повернутися до виконання польотного завдання з урахуванням льотно-технічних обмежень. Неприйняття рішень щодо керування системою може призводити до погіршення ситуації польоту.

У складній ситуації необхідно зазначити незначні відхилення від вимог виконання польотного завдання. Відхилення значень параметрів від запланованих значною мірою ускладнює процес повернення до польотного завдання. Існує необхідність прийняття рішення щодо керування системою задля покращення ситуації польоту.

Аварійна ситуація буде характеризуватися значними відхиленнями від вимог виконання польотного завдання. Значні відхилення значень параметрів від запланованих надзвичайно ускладнюють процес повернення до польотного завдання. Ситуація характеризується значним зниженням рівня безпеки. Не контрольованість ситуації може призвести до катастрофи, тому існує необхідність миттєвого прийняття рішення щодо керування системою.

Катастрофічну ситуацію доцільно охарактеризувати цілковитим не виконанням польотного завдання, що пов'язане з критичним відхиленням значень параметрів від запланованих. Катастрофічні відхилення унеможливають процес повернення до польотного завдання з урахуванням льотно-технічних характеристик БПЛА, а також наявністю незапланованих перешкод, можливе зіткнення з якими призводять до втрати системи в цілому.

3.2. Побудова класів польотних ситуацій БПЛА

Визначення класу наявної польотної ситуації є важливим елементом виконання місії, особливо у випадку використання у обчисленнях відновлених даних від сенсорів БПЛА. Для метричного формулювання класів польотних

ситуацій, наведених у п.п. 3.1., використаємо критерій, що враховує ступінь відхилення БПЛА від вимог виконання польотного завдання. Для цього польотне завдання повинне містити набір запланованих значень параметрів, що задаються перед виконанням польоту з урахуванням всіх його складностей та особливостей. Надалі точне дотримання запланованих параметрів польоту відповідатимуть нормальному перебігу польотної місії.

Технічно задати значення запланованих параметрів польоту при багатопараметричному підході є складною задачею навіть для групи експертів, відповідно до цього, у якості основних параметрів місії пропонується задати користувачем тільки координати місцеположення контрольних точок польоту БПЛА у певні моменти часу, що відображають чотиривимірну заплановану траєкторію руху БПЛА. Інші заплановані параметри БПЛА оцінюються за допомогою математичної моделі БПЛА перед початком польотного завдання. Крім того, для отримання запланованих параметрів може застосовуватись апріорна інформація розрахована за результатами попередніх спроб виконання аналогічного польотного завдання чи метод експертних оцінок.

Таким чином, для кожного параметра, що використовується для оцінювання класу польотної ситуації отримується набір значень, що відповідають нормальному перебігу польотного завдання.

Іншим важливим елементом багатоальтернативної класифікації є встановлення метрики класів польотних ситуацій, оскільки наявність певної ситуації відповідає певним відхиленням окремих параметрів від запланованих значень на певну величину. Слід зауважити, що величини відхилень є різними для різних класів ситуацій і не можуть бути обчислені лінійно. Відповідно до цього, пропонується ввести значення запланованої величини параметра, що відповідатиме певному класу ситуації. Ця величина характеризує відхилення від запланованого значення у певному метричному просторі та відображає певний стан БАС.

У випадку багатопараметричної класифікації польотних ситуацій наведеному у п.п. 3.1. пропонується оцінити величину Z для кожного класу

польотної ситуації та для кожного з параметрів (рис. 3.2). Надалі метрика Z буде використовуватися для розрахунку апостеріорних ймовірностей класів ситуацій.

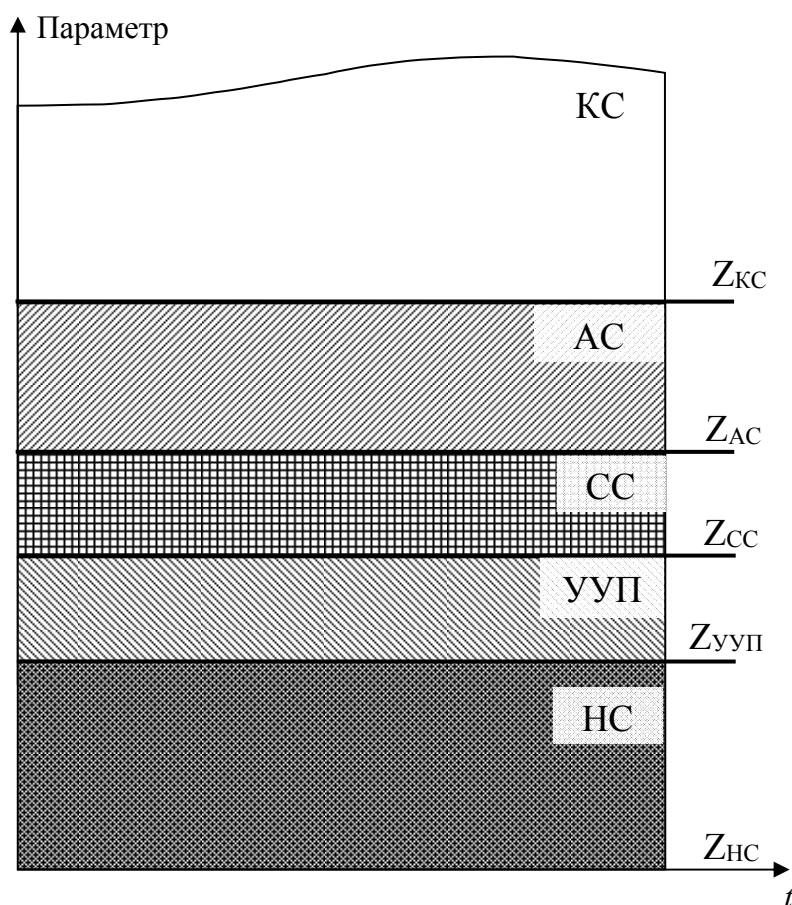


Рис. 3.2. Класи польотних ситуацій відповідно до п.п.3.1

Відповідно до ймовірності виникнення класу польотної ситуації наведеної у табл. 3.2 сформуємо межі класів Z . Проте, значення катастрофічної ситуації доцільно задавати користувачу виходячи з суджень про невдале виконання польотного завдання (п.п. 3.1.). Поняття провалу місії залежить від характеру польотного завдання та меж допустимих відхилень у певний момент часу. Завдання граничного порогу $Z_{КС}$ складається з визначення межі граничного відхилення БПЛА від заданої траєкторії руху, тобто визначається координатами. Граничні значення інших параметрів системи визначаються її технічними характеристиками та можуть вираховуватися за математичною моделлю БПЛА чи з використанням експертних оцінок на певний момент часу.

Припускаючи нормальність похибок датчиків БАС, та використовуючи апріорно відомі ймовірності виникнення польотних ситуацій (табл. 3.2) з нормативних документів [60], розрахунок меж класів ситуацій виконаємо за оберненим розрахунком параметрів розподілу Гауса. Для цього виконаємо масштабування нормального закону розподілу випадкової величини до метрики класів ситуацій, розрахувавши параметр дисперсії для відомої ймовірності катастрофічної ситуації та заданого граничного відхилення.

Використаємо нормальний закон розподілу випадкової величини:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-M)^2}{2\sigma^2}} dx,$$

представлений через функцію Лапласа:

$$P(x) = \Phi\left(\frac{x-M}{\sigma}\right) + \frac{1}{2}, \quad (3.1)$$

де функція Лапласа наступного вигляду:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (3.2)$$

Розрахуємо параметри нормального закону розподілу за відомою ймовірністю появи катастрофічної ситуації та відхиленням параметру БПЛА (рис. 3.3).

У цьому випадку параметру математичного сподівання відповідає заплановане значення певного параметру польоту:

$$M = Z_{НС}.$$

Середнє квадратичне відхилення розрахуємо виходячи з (3.1) наступним чином:

$$\Phi\left(\frac{x-M}{\sigma}\right) = P(x) - \frac{1}{2},$$

$$x - M = \Phi^{-1}\left(P(x) - \frac{1}{2}\right)\sigma,$$

$$\sigma = \frac{x-M}{\Phi^{-1}\left(P(x) - \frac{1}{2}\right)}.$$

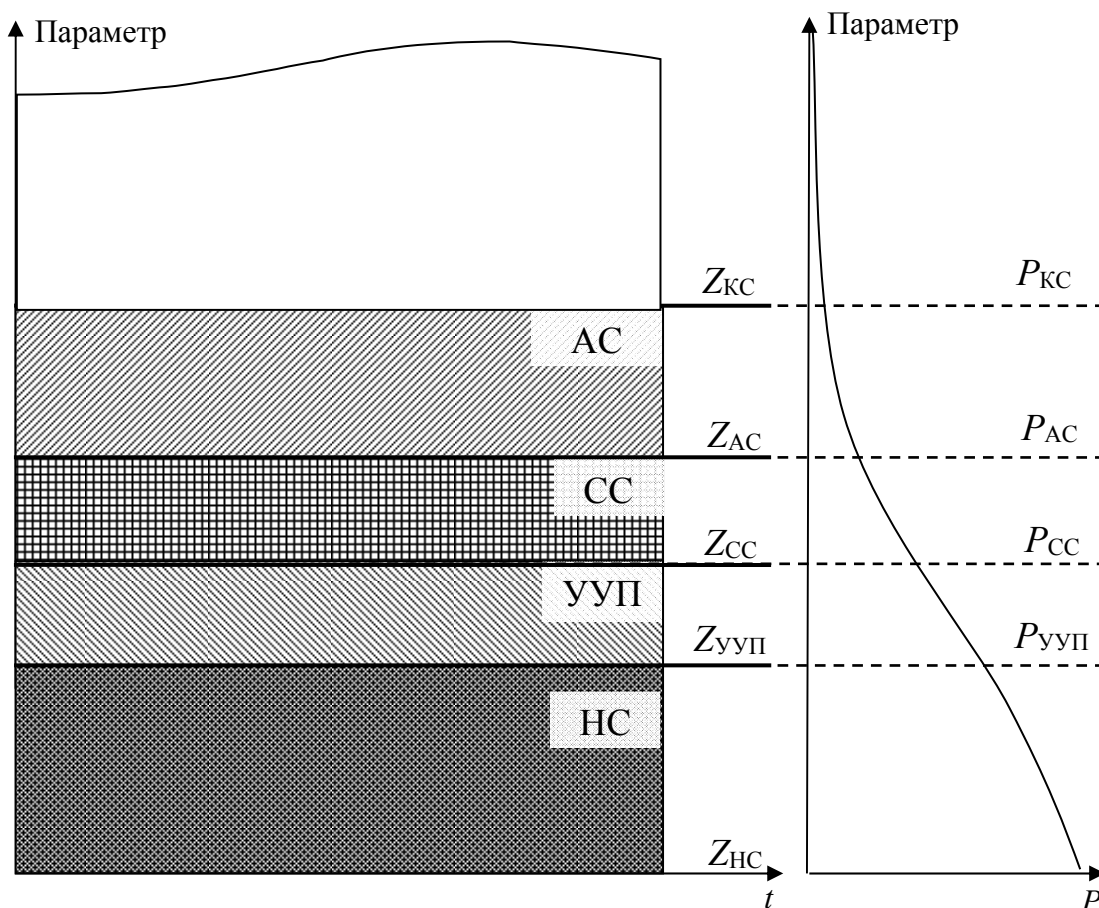


Рис. 3.3. Вибір метрики ситуацій

У якості ймовірності використаємо ймовірність появи найгіршого випадку – катастрофічної ситуації, тобто:

$$P(x) = P_{кс}.$$

Надалі за оціненими параметрами розподілу виконується оцінювання граничних значень для кожної з польотної ситуації :

$$Z = \Phi^{-1}\left(P - \frac{1}{2}\right)\sigma + M, \quad (3.3)$$

$$\text{де } P = \begin{bmatrix} P_{УУП} \\ P_{СС} \\ P_{АС} \\ P_{КС} \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} Z_{УУП} \\ Z_{СС} \\ Z_{АС} \\ Z_{КС} \end{bmatrix}.$$

Граничні значення будуть використовуватися для подальшого оцінювання умовних щільностей ймовірностей. Приклад візуалізації метрик класів ситуацій у тривимірному просторі для аналізу виконання польоту БПЛА за критерієм відхилення від заданої траєкторії руху наведено на рис. 4.36.

3.3. Оцінювання класу ситуації з урахуванням відновлених даних

Визначення класу наявної польотної ситуації є важливим елементом виконання місії, особливо у випадку використання у обчисленнях відновлених даних від датчиків БПЛА. У випадку багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій застосовується метрика класів обчислена за (3.3). Відповідно до якої обчислюються граничні межі класів ситуацій.

Розпізнавання класу польотної ситуації виконаємо за ймовірнісним підходом з використанням послідовного багатоальтернативного аналізу [8, 35, 47]. Для цього застосуємо ймовірнісний метод класифікації заснований на формулі Байєса [40, 41, 57]. Оскільки, цьому підходу властива мінімальна ймовірність похибки розпізнавання [57] та простота реалізації.

Критерій Байєса ґрунтується на використанні повної групи несумісних гіпотез, роль яких при розпізнаванні виконують класи польотних ситуацій.

Використаємо класифікацію польотних ситуацій наведену у п.п. 3.2., та позначимо:

A_0 – Нормальна ситуація;

A_1 – Ускладнення умом польоту;

A_2 – Складна ситуація;

A_3 – Аварійна ситуація;

A_4 – Катастрофічна ситуація.

Відомі апіорні ймовірності появи цих класів, визначені з нормативних документів функціонування БАС: $P_{УУП}$, $P_{СС}$, $P_{АС}$, $P_{КС}$ за табл. 3.2. Оскільки апіорні ймовірності класів ситуацій утворюють повну групу подій:

$$\sum_{i=1}^N P(A_i) = 1,$$

тоді,

$$P_{НС} = 1 - (P_{УУП} + P_{СС} + P_{АС} + P_{КС}).$$

За кожним класом польотної ситуації закріплюється певна умовна щільність ймовірності нормального розподілу $p_k(x)$ (3.4), рис. 3.4.

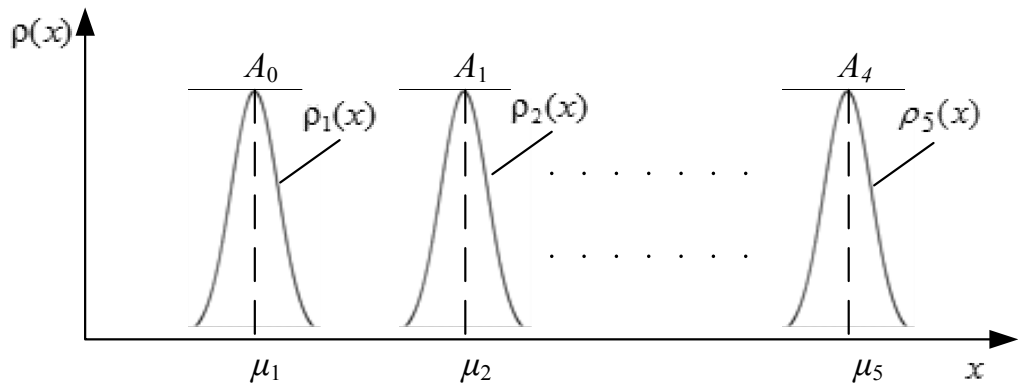


Рис. 3.4. Розміщення умовних щільностей ймовірностей відповідно до класів ситуацій

Причому, умовні щільності розмістимо таким чином, щоб гарантувати 99,7% ймовірності появи випадкової величини у межах класу польотної ситуації рис. 3.5.

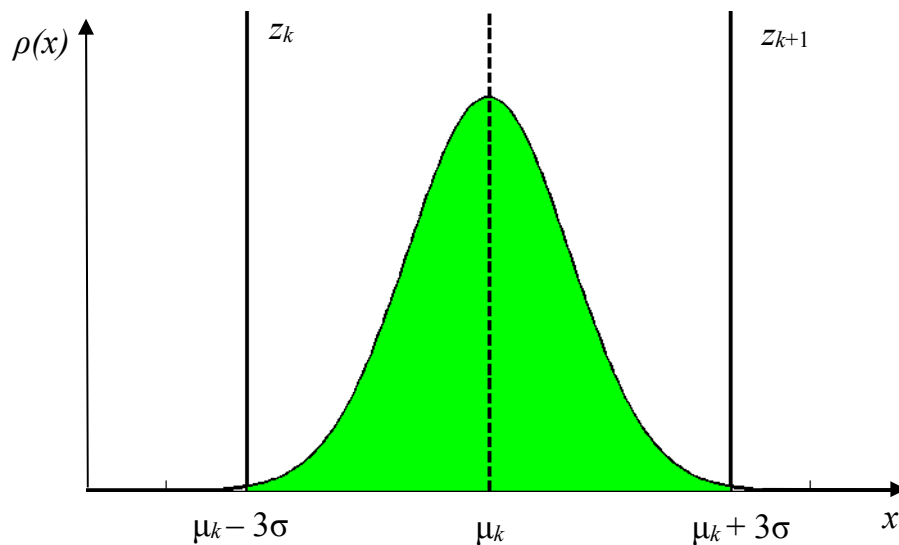


Рис. 3.5. Умовна щільність ймовірності класу ситуації

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

$$\rho_k(x) = \frac{1}{(2\pi)^{K/2} |B_k|^{-1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2} (B_k^{-1} (x - M_k)^T \times (x - M_k))\right], \quad (3.4)$$

де

$x = (x_1, x_2, \dots, x_s)$ – вектор результатів вимірювань всіх параметрів,

$M_k = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_s)$ – вектор математичних сподівань для кожного з параметрів, оцінюється за формулою (3.5),

B_k – матриця середньоквадратичних відхилень:

$$B_k = \begin{vmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1s} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \cdots & \sigma_{2s} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sigma_{s1} & \sigma_{s2} & \cdots & \sigma_s^2 \end{vmatrix}.$$

Елементи матриці B_k оцінюються за формулою (3.6).

На рис. 3.6 наведено щільність багатопараметричного нормального розподілу для двох параметрів побудовану за (3.7).

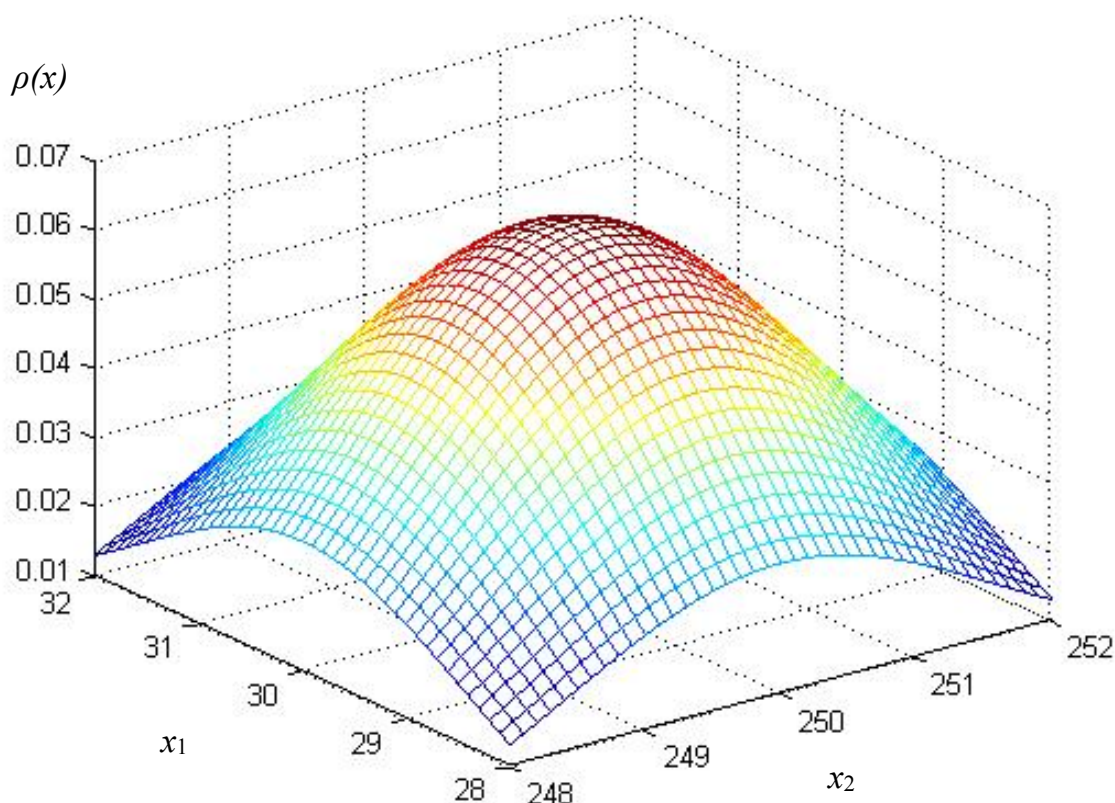


Рис. 3.6. Щільність багатопараметричного нормального розподілу для двох параметрів

Оцінювання класу наявної польотної ситуації за величиною відхилення від запланованої траєкторії руху виконується за допомогою використання плану польоту. При цьому, план польоту містить польотне завдання у вигляді координат точок обов'язкового прольоту. Час прольоту контрольних точок теж може враховуватись у певних випадках. При використанні контрольних точок

обов'язковим є інтерполяція запланованих параметрів за координатами БПЛА на час спостереження для подальшого знаходження величин відхилень:

$$D(t) = \sqrt{(x(t) - x_r(t))^2 + (y(t) - y_r(t))^2 + (z(t) - z_r(t))^2},$$

де $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ – заплановані координати траєкторії руху на час t ,

$x_r(t)$, $y_r(t)$, $z_r(t)$ – координати місцеположення БПЛА на час t .

У цьому випадку у якості умовних щільностей ймовірностей використовуються Гаусові щільності:

$$\rho_k(x) = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2}\right),$$

з математичним сподіванням:

$$\mu_k = 0.5(z_k + z_{k+1}). \quad (3.5)$$

Значення середньо-квадратичного відхилення для кожної щільності обираються таким чином, щоб гарантувати ймовірність розпізнавання класу ситуації у 99.7%, тобто за правилом «3 σ » [11], тоді:

$$\sigma_k = \frac{z_k - \mu_k}{3}. \quad (3.6)$$

Так на рис. 3.7 наведено умовні щільності ймовірностей класів ситуацій у випадку виникнення катастрофічної ситуації при відхиленні за 90 м від запланованої траєкторії руху, а на рис. 3.8 результати обчислення апостеріорних ймовірностей для кожної з ситуацій.

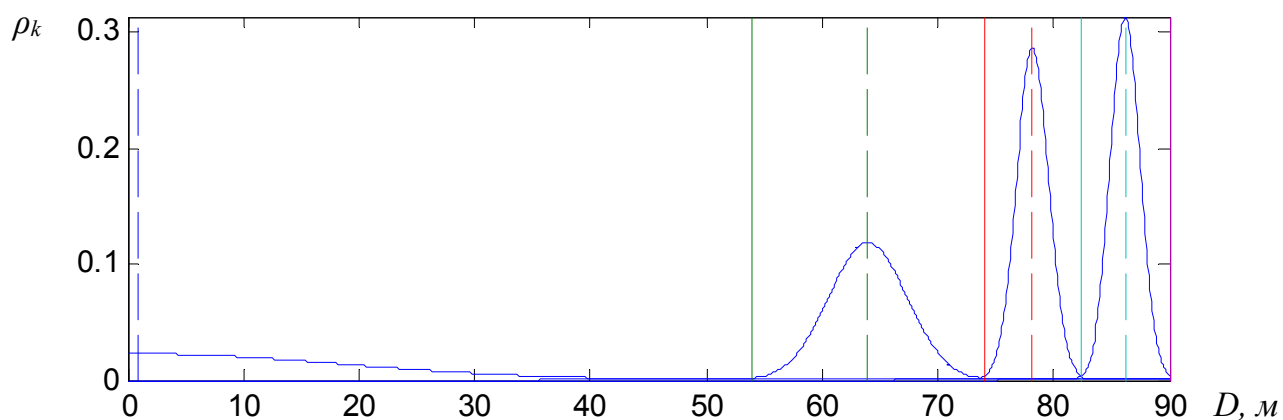


Рис. 3.7. Умовні щільності ймовірностей класів ситуацій

Відповідно до критерію Байеса для кожного з класів польотної ситуацій обчислюється апостеріорна ймовірність:

$$q_k(x) = \frac{p_k \rho_k(x)}{\sum_{k=1}^N p_k \rho_k(x)}, \quad (3.7)$$

де

N – кількість класів,

K – кількість параметрів,

$s = \overline{1, K}$ – індекс відповідного параметру,

$k = \overline{1, N}$ – індекс відповідного класу.

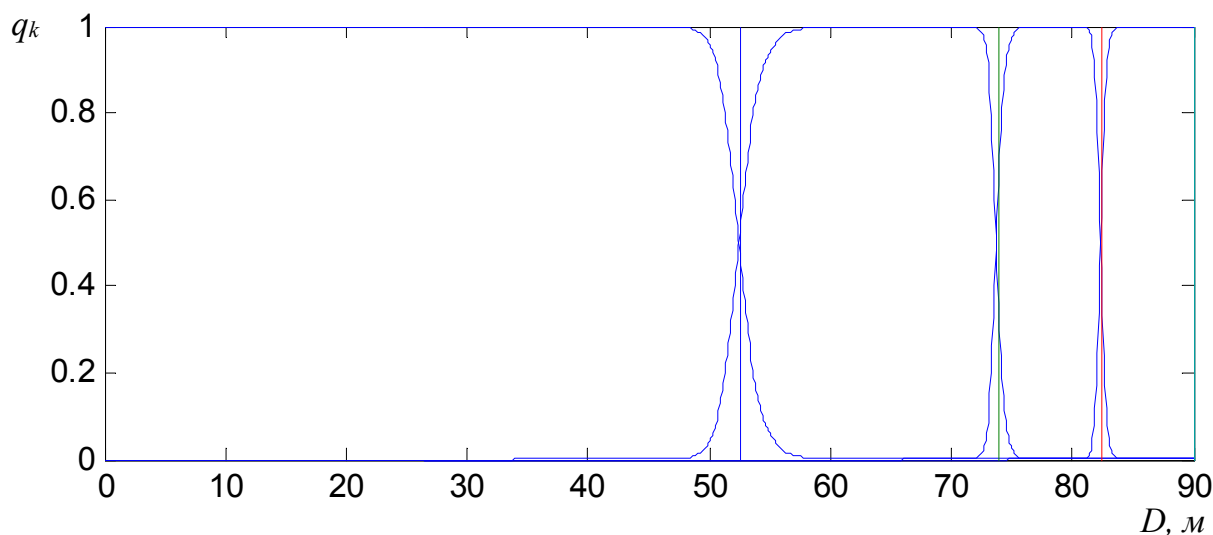


Рис. 3.8. Апостеріорні ймовірності класів ситуацій

Нехай гіпотеза H_k полягає у належності параметра, що спостерігається, до певного класу A_k . Рішення на користь гіпотези H_k приймається за умови [40, 41]:

$$p_k \rho_k(x) = \max\{p_j \rho_j(x), j = \overline{1, N}\}. \quad (3.8)$$

Тобто, на користь класу A_k у межах якого добуток щільності і апіорної ймовірності (рис. 3.9) має максимальне значення.

Якщо максимум досягається на декількох значеннях $j = j_1, \dots, j_p$ ($p \geq 2$), тоді рішення приймається на користь будь-якої з гіпотез H_{j_1}, \dots, H_{j_p} . Проте, виходячи з питань безпеки польотів, приймають рішення на користь ситуації найгіршого

випадку. Тобто, на користь гіпотези $H_{j_{\max}}$, де $j_{\max} := \max(j_1, \dots, j_p)$. У випадку оцінювання класу ситуації за відхиленням від запланованої траєкторії руху матриця Z у п.п. 3.2. містить координати контрольних точок. У випадку використання повної групи параметрів, можливе використання статистичної інформації з попередніх місій БАС (наприклад для таких параметрів, як заряд батареї електроживлення чи палива), чи математичної моделі БАС для прогнозування допустимих значень параметрів під час виконання польотного завдання.

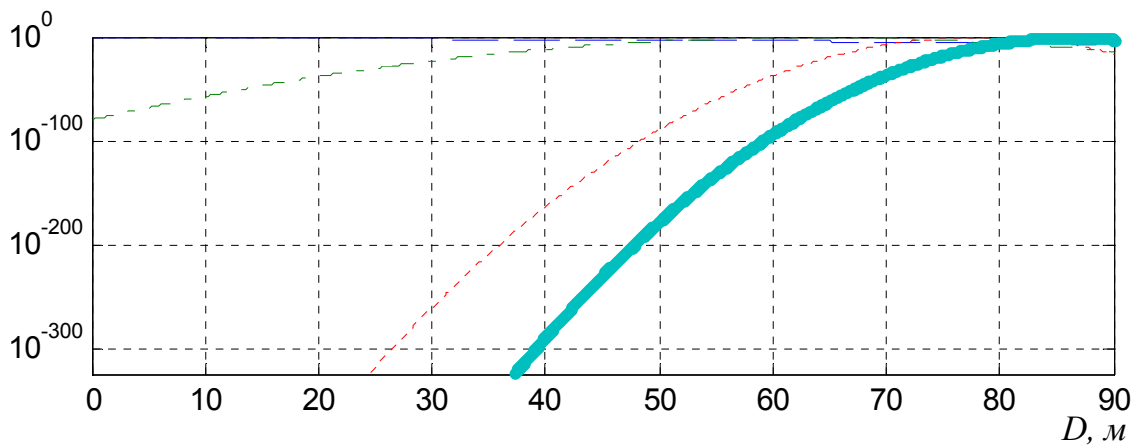


Рис. 3.9. Добуток апіорної та умовної щільності ймовірності

У загальному випадку удосконалений метод багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій БПЛА для оцінювання наявного класу ситуації можна представити у вигляді структурної схеми наведеної на рис. 3.10.



Рис. 3.10. Структурна схема удосконаленого методу багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій БПЛА

Для зведення запланованої траєкторії руху до часу вимірювання пропонується використовувати багатопараметричний метод відновлення даних

(п.п. 2.1, стор 50) з використанням координат місцеположення контрольних точок польотного завдання у якості вхідної інформації.

Висновки до розділу 3

1. Представлено межі безпеки польоту відповідно до класу ситуації та типу БПЛА. Розглянуто матрицю оцінки факторів ризику для безпеки польотів, що формується на основі ймовірності появи небезпек та їх впливу на польотну ситуацію. Це дозволяє прийняти рішення щодо прийнятності факторів ризику та подальшого виконання польоту.
2. Запропоновано визначення польотних ситуацій адоптованих до застосування у БАС, що враховують відмінності безпілотної авіації від пілотованої а також складність та особливості виконання польотного завдання. Це дозволить оцінити вдале виконання польотного завдання відповідно до поставлених задач та підвищити ситуаційну обізнаність оператора БАС.
3. Виведено математичну залежність (3.3) для оцінювання метрики класів польотних ситуацій для БАС на основі критерію, що враховує ступінь відхилення параметрів БПЛА від запланованих значень. Це дозволяє виконати розрахунок метрик класів польотних ситуацій для кожного польотного завдання окремо.
4. Удосконалено метод багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій БПЛА за величиною відхилення польотних параметрів БПЛА від запланованих значень з використанням метрики багатоальтернативної класифікації та апіорної інформації відповідно до критерію Байєса (3.8). Використовуваний критерій дозволяє визначити клас наявної польотної ситуації на основі прийняття найбільш вірогідного рішення. Окрім того, отримуються значення ймовірності правильного розпізнавання класу, що є важливим для функціонування БАС та безпеки польотів.

РОЗДІЛ 4

РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ПОЛЬОТНИХ ДАНИХ ТА БАГАТОАЛЬТЕРНАТИВНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ

4.1. Програмно-алгоритмічне забезпечення декодування та візуалізації польотних даних

4.1.1. Призначення програмного забезпечення

Тимчасова або тривала втрата даних від БПЛА робить його неконтрольованим та таким, що несе загрозу для людей та безпеки авіації в цілому. Постійний контроль руху БПЛА є вкрай важливим. Аналіз виконання польотного завдання відіграє важливу роль у безпеці польотів. Детальний аналіз виконання місії БПЛА дозволяє дослідити параметри руху та виділити небезпечні фактори, що можуть стати на загрозі виконання іншого польотного завдання. Для декодування, візуалізації та детального аналізу результатів виконання польотного завдання було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для декодування та візуалізації польотних даних (ПЗДВПД) [1]. Програмне забезпечення (ПЗ) дає можливість оператору БПЛА контролювати його стан шляхом декодування, обробки та візуалізації польотних даних, які фіксуються в файл засобами наземної станції або в бортовій пам'яті БПЛА. ПЗ використовує метод багатопараметричного відновлення інформації з використанням сплайн-функцій для відновлення пропусків або коригування аномальних даних, що є типовою проблемою обладнання БАС. Пропуски даних унеможливають проведення аналізу виконання польотного завдання та становлять загрозу подальшим польотам БПЛА. Аналіз виконання польотного завдання виконується з застосуванням принципу багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій, що дозволяє класифікувати наявну ситуацію у кожний часовий відлік польотного завдання. ПЗ передбачає різний спектр можливих візуалізацій польотних даних, в залежності від навичок оператора БАС.

4.1.2. Функціонування програмного забезпечення

Програмне забезпечення для декодування та візуалізації польотних даних розроблене у програмному середовищі *MATLAB* [1], використовує модульну концепцію побудови та графічний інтерфейс (*Graphical User Interface – GUI*) для взаємодії з оператором-користувачем. Застосування *GUI* дозволяє перейти від програмування вхідних даних до спеціалізованого інтерфейсу взаємодії для аналізу польотної інформації.

Структура ПЗ наведена на рис. 4.2. Після запуску ПЗ користувачу відображається головне меню (рис. 4.1).

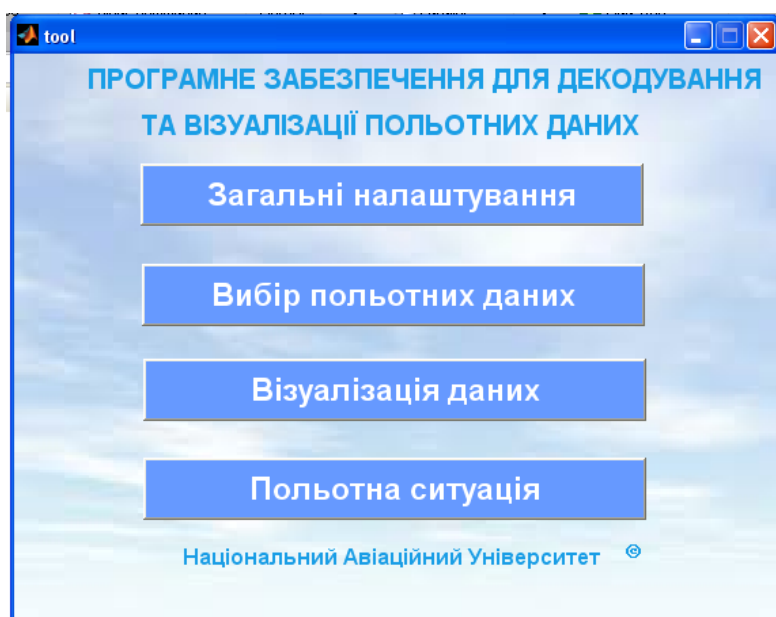


Рис. 4.1. Головне меню ПЗДВПД

Головне меню ПЗ забезпечує навігацію серед функціональних можливостей:

- Загальні налаштування;
- Вибір польотних даних;
- Візуалізація польотних даних;
- Польотна ситуація.

Загальні налаштування містять налаштування для збереження результатів декодування та відновлення даних на комп'ютері користувача. Зображення меню налаштувань наведено на рис. 4.3.

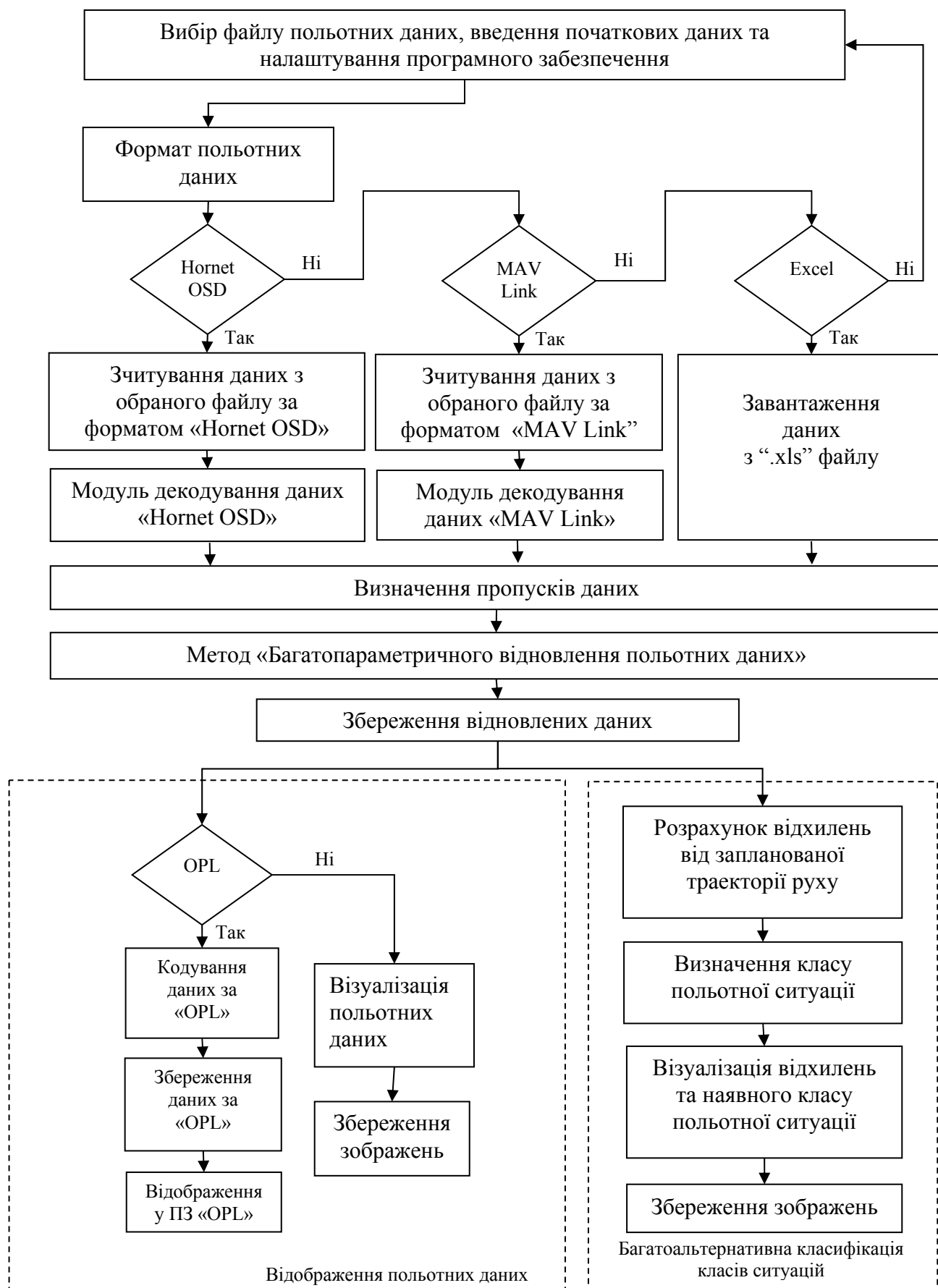


Рис. 4.2. Структурна схема програмного забезпечення

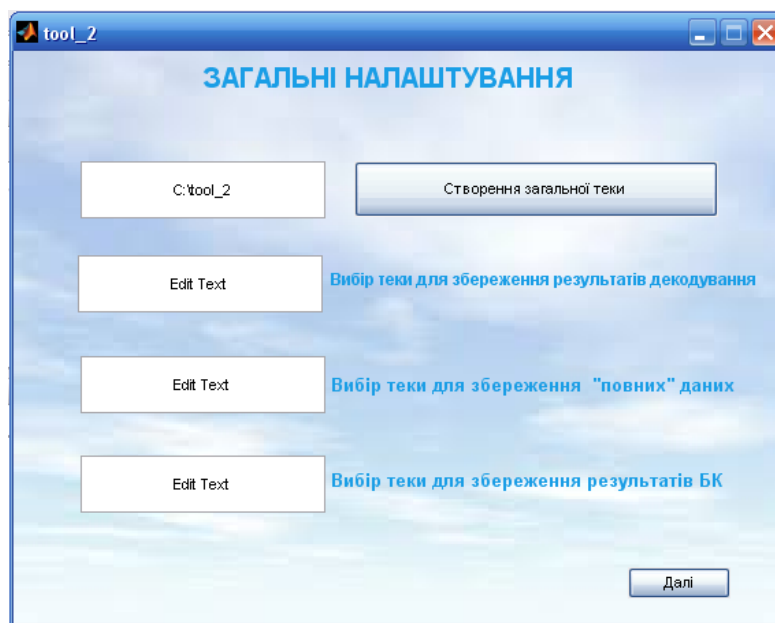


Рис. 4.3. Меню загальні налаштування ПЗДВПД

Користувачу пропонується задати наступні параметри:

- основну теку для функціонування ПЗ;
- тека для збереження результатів декодування;
- тека для збереження «повних» даних;
- тека для збереження результатів багатоальтернативної класифікації.

У випадку, якщо користувач не задає налаштування у меню «загальні налаштування», ПЗ використовує у якості основної теки – місцерозташування ПЗ, у якості теки для збереження результатів декодування – «decoded», тека для збереження повних даних – «full_data», тека для збереження результатів багатоальтернативної реєстрації – «classification». Всі теки створюються у загальній теці.

У меню «Вибір польотних даних» користувач вибирає та завантажує файли, що містять зафіксовані польотні дані та опис запланованої траєкторії руху, що буде використовуватись для оцінювання величин відхилень під час виконання польотного завдання. Зовнішній вигляд меню наведено на рис. 4.4.

Зазвичай польотні дані можуть бути отримані шляхом їх запису на носій даних за допомогою пристрою фіксації на борту БПЛА під час виконання польотного завдання чи на наземній станції керування польотом за допомогою спеціалізованого ПЗ. В залежності від типу та виробника обладнання БАС

польотні дані можуть бути закодовані одним із спеціалізованих форматів. Найбільш поширенішими з них є : «Hornet OSD», «MAV Link», «OPL»,

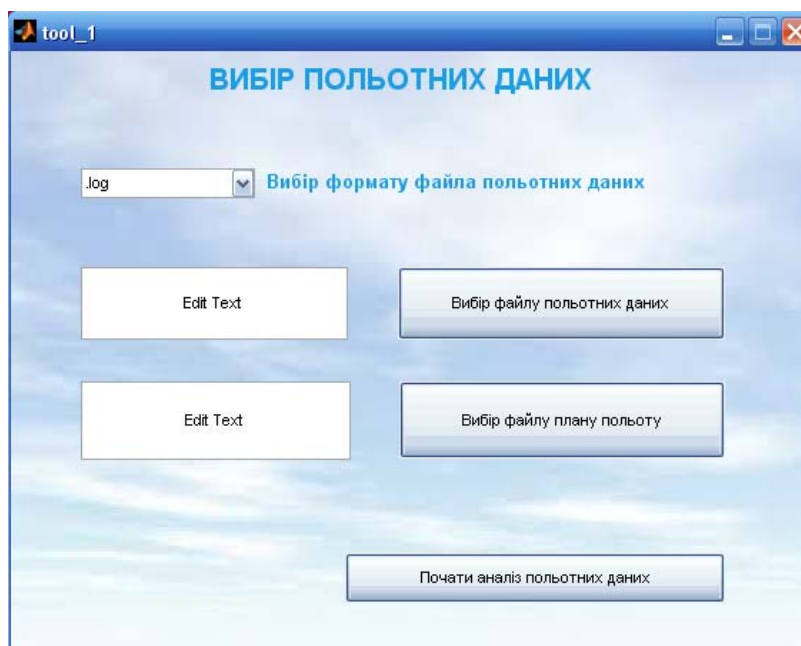


Рис. 4.4. Меню «Вибір польотних даних» ПЗДВПД

ПЗ підтримує польотні дані надані у форматах «Hornet OSD» чи «MAV Link». Крім того, можливе використання раніше оброблених даних та збережених у вигляді таблиць у ПЗ «MS EXCEL» чи даних «MATLAB». Модульна структура ПЗ дозволяє розширювати межі застосування, томі у випадку необхідності можливим є розробка та використання модулю декодування будь-якого іншого формату польотної інформації.

У випадку якщо користувач не вказав правильного формату вхідних даних ПЗ спробує визначити формат даних автоматично. Для цього спершу використає розширення файлу даних так «Hornet OSD» відповідає файли з розширенням «.log», а формату «MAV Link» – «.mavlog». Приклад даних у форматі «Hornet OSD» наведено на рис. 4.5. Потім ПЗ виконає зчитування даних у обраному форматі і якщо формат вірний дані будуть декодовані та розміщені у певні зміни у середовищі ПЗ.

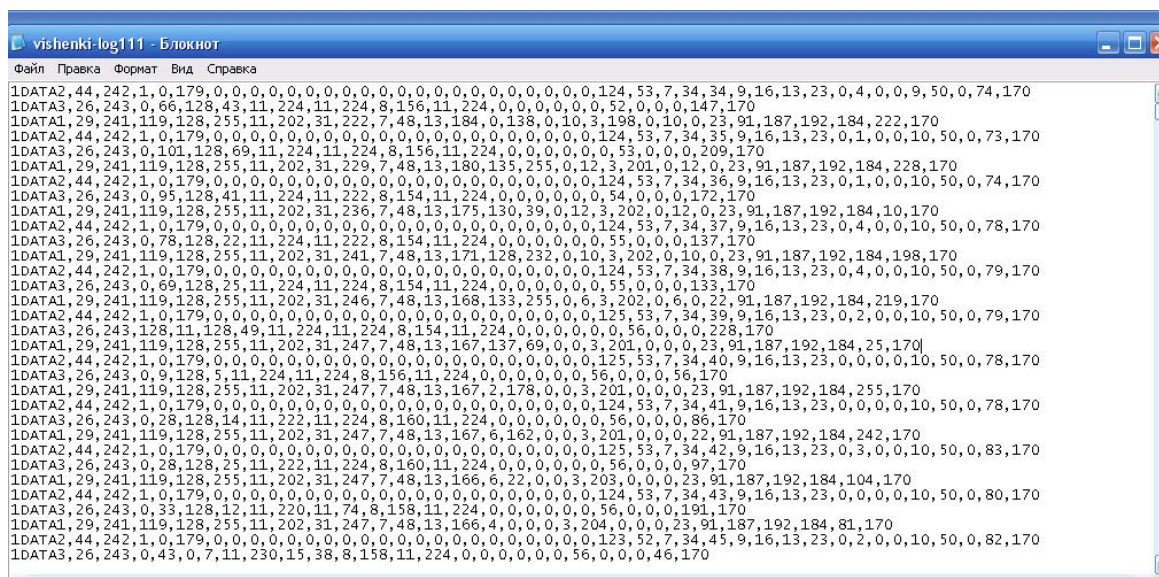


Рис. 4.5. Дані у форматі «Hornet OSD»

Основні параметри, що можуть передаватися за форматом «Hornet OSD» та їх характеристики наведені у табл. 4.1.

Отримані параметри передаються на модуль визначення пропусків. Інформація про пропуски даних може бути отримана з файлу запису даних з матриць стану датчиків. У випадку відсутності цієї інформації, пропуски приймають максимальне чи мінімальне значення параметру, що може бути отримане системою. У результаті визначаються відсутні або аномальні значення параметрів та проміжки часу на яких вони були зафіксовані.

Для відновлення пропущених даних застосовується метод багатопараметричного відновлення польотних даних. Для цього спершу визначається період інтерполяції даних а потім розраховуються коефіцієнти сплайн-функцій. Потім отримані коефіцієнти застосовуються для інтерполяції втрачених у певний проміжок часу даних. На наступному етапі відновлені дані поєднуються з наявними даними та утворюють «повні» дані. «Повні» дані зберігаються у файлі даних ПЗ та стають доступними для аналізу польотної ситуації.

Таблиця 4.1 – Параметри формату «Hornet OSD»

Назва параметра	Розмір, біт	Діапазон змін	Примітка
Група «Позиціювання»			
Координати GPS	8	WGS	Один молодший біт відповідає 0,006 кутової секунди
Курсовий кут за GPS	2		Один молодший біт відповідає 0,01 градуса
Швидкість за GPS	2	0 ... 120 м/с	
Висота за GPS	2	0 ... 3000 м	
Кутове відхилення	2	0 ... 1000 м	
Помилка визначення місця розташування	1	0 ... 1000 м	
Група «Орієнтація і управління»			
Крен	2	$\pm 90^\circ$	значення місця розташування
Тангаж	2	$\pm 90^\circ$	значення місця розташування
ШІМ газу	2	1000 ... 2000 мс	Сигнал серводвигуна
ШІМ елеронів	2	1000 ... 2000 мс	Сигнал серводвигуна
ШІМ керма висоти	2	1000 ... 2000 мс	Сигнал серводвигуна
ШІМ керма напрямку	2	1000 ... 2000 мс	Сигнал серводвигуна
Група «Режим польоту і обмін даними»			
Режим управління	1	Містить кілька параметрів режиму польоту	
Тип траєкторної задачі			
Частота оновлення даних GPS	1	Містить кілька параметрів частоти оновлення даних	
Частота оновлення координат місця розташування			
Частота обміну даними			
Група «Параметри навігації»			
Поточний азимут цілі	2	$\pm 90^\circ$	
Поточна висота цілі	2	0...3000 м	
Поточна швидкість	2	0...120 м/с	Один молодший біт відповідає 0,1 м / с
Координати поточної початкової та кінцевої точок	8	WGS	
Група “ Енергоспоживання і температура ”			
Напруга живлення двигуна	2		Один молодший біт відповідає 0,1 В
Напруга живлення системи керування	1		
Струм	2	0 ... 60 А	
Витрата акумулятора	2	0 ... 65 Ah	
Температура	1	-40... +120 °С	

Координати місцеположення БПЛА є одними з найважливіших параметрів руху, що впливають на безпеку та характеризують вдале виконання польотного завдання. Вдалому виконанню польотного завдання відповідає політ за заданою траєкторією, з допустимими межами відхилень. Польотне завдання задається у вигляді координат контрольних точок місцеположення БПЛА у певні часові відліки з межами максимально-допустимого відхилення від них у метрах.

Для розрахунку відхилення БПЛА від заданої траєкторії руху координати місцеположення БПЛА та координати контрольних точок переводяться з геодезичної системи координат (*LLA*) у глобальну *ECEF* систему для розрахунку величин відхилень у кожний момент часу. У випадку, якщо координати контрольних точок не відповідають часу спостереження, чи є пропущеними застосовується інтерполяція сплайном для інтерполяції даних на певний час. Для визначення класу польотної ситуації за величиною відхилення та похибками визначення місцеположення оцінюються метрика класів ситуацій. Величини відхилень класифікуються за метрикою класів ситуацій та оцінюється клас наявної польотної ситуації з ймовірністю його визначення.

В залежності від налаштувань ПЗ графіки польотних ситуацій можуть бути виведені користувачу для ознайомлення чи автоматично збережені у вигляді зображень у теку вказану у налаштуваннях ПЗ.

На заключному етапі функціонування ПЗ виконується візуалізація повних даних. Дані можуть бути представлені у ПЗ «*OPL*». Для цього дані кодуються за відповідним форматом та зберігаються на комп'ютері користувача. Далі ПЗ ініціює запуск відповідного ПЗ для відображення польоту та характеристик БПЛА для подальшого аналізу. При цьому, спеціалізоване ПЗ має бути наявними для доступу на комп'ютері користувача. Крім того, ПЗ має власний графічний інтерфейс для візуалізації польотних даних. Меню візуалізації польотних даних (рис. 4.6) дозволяє обрати перелік параметрів для подальшого відображення.

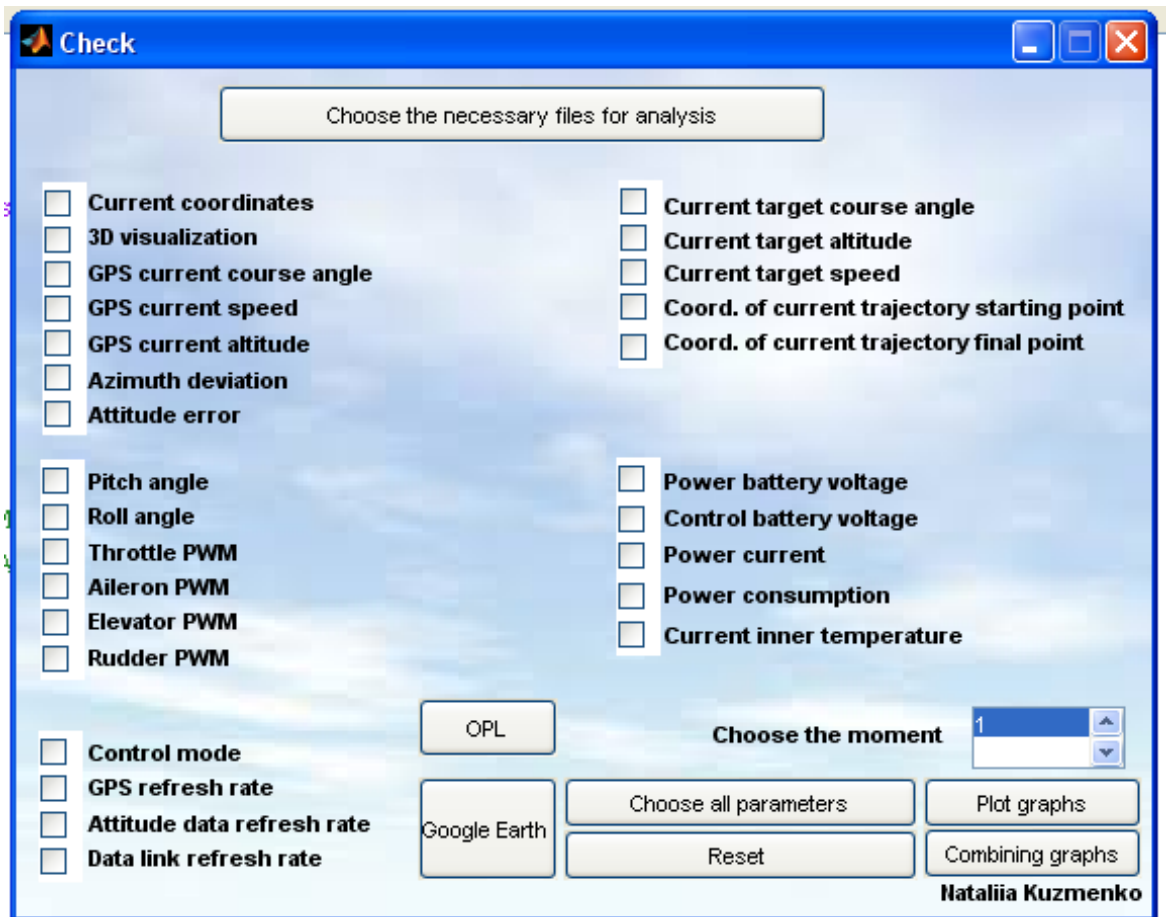


Рис. 4.6. Меню візуалізації польотних даних

Натисканням кнопки "Plot graphs" автоматично будуються та відображаються обрані параметри. Графіки відображаються на екрані комп'ютера і автоматично зберігаються у відповідну теку з розширеннями . jpeg та . fig з можливістю подальшого редагування графіків у середовищі *MATLAB*.

На розсуд користувача забезпечується суміщення графіків на одному полі, а також їх синхронне відображення з довільним вертикальним масштабуванням.

Існує альтернативна можливість відображення траєкторії польоту в плані на задалегідь завантаженої мапі, або з використанням супутникової картографії ПЗ «GoogleEarth». Натискаючи кнопку «GoogleEarth» траєкторія польоту відображається за допомогою супутникової картографії «Google Планета Земля». Це відбувається шляхом створення та запису *KML* файлу з геоінформаційними відомостями кожної точки місцяположення (географічна широта, довгота, а також висота над рівнем моря, або над рівнем поверхні

Землі). Програмний комплекс автоматично відкриває додаток «Google Планета Земля» та зчитуючи дані *KML* файлу відображає траєкторію мітками на карті.

Для дослідження значень параметрів у певний проміжок часу можливе введення міток на графіки у вікні «Мітка». При цьому мітка з'явиться на всіх обраних графіках і на зображенні траєкторії в плані польоту.

4.1.3. Особливості використання програмного забезпечення

ПЗ встановлюється на комп'ютер з швидкодією центрального процесора не менше 1,1 ГГц, операційної пам'яттю не менше 1 Гбайт, вільним дисковим простором не менше 200 Мбайт, операційною системою Windows. Рекомендоване дозвіл екрану – 1280×768.

На комп'ютері повинно бути встановлене середовище розробки *MATLAB*.

ПЗ виконано у вигляді виконуваного файлу (. exe) і не вимагає спеціальної установки. Після копіювання файлу *TelemetryCheck.exe* на комп'ютер – робочу станцію, бажано створити посилання на запуск файлу і розмістити її на робочому столі або в панелі завантаження. Частина коду ПЗДВПД наведена у додатку А.

4.2. Верифікація методів шляхом комп'ютерного моделювання

4.2.1. Опис програмного забезпечення моделювання

Для верифікації розробленого методу було розроблене спеціалізоване ПЗ у програмному середовищі *MATLAB*, що дозволяє змоделювати траєкторію руху БПЛА за заданими параметрами та дослідити функціонування методу багатопараметричного відновлення даних БПЛА для пропусків даних. Загалом структурна схема ПЗ наведена на рис. 4.7.

Спочатку ПЗ за введеними початковими даними створює початкову траєкторію руху БПЛА. Для спрощення подальших розрахунків та збільшення кількості контрольних точок польотне завдання генерується з дискретністю вимірювань.

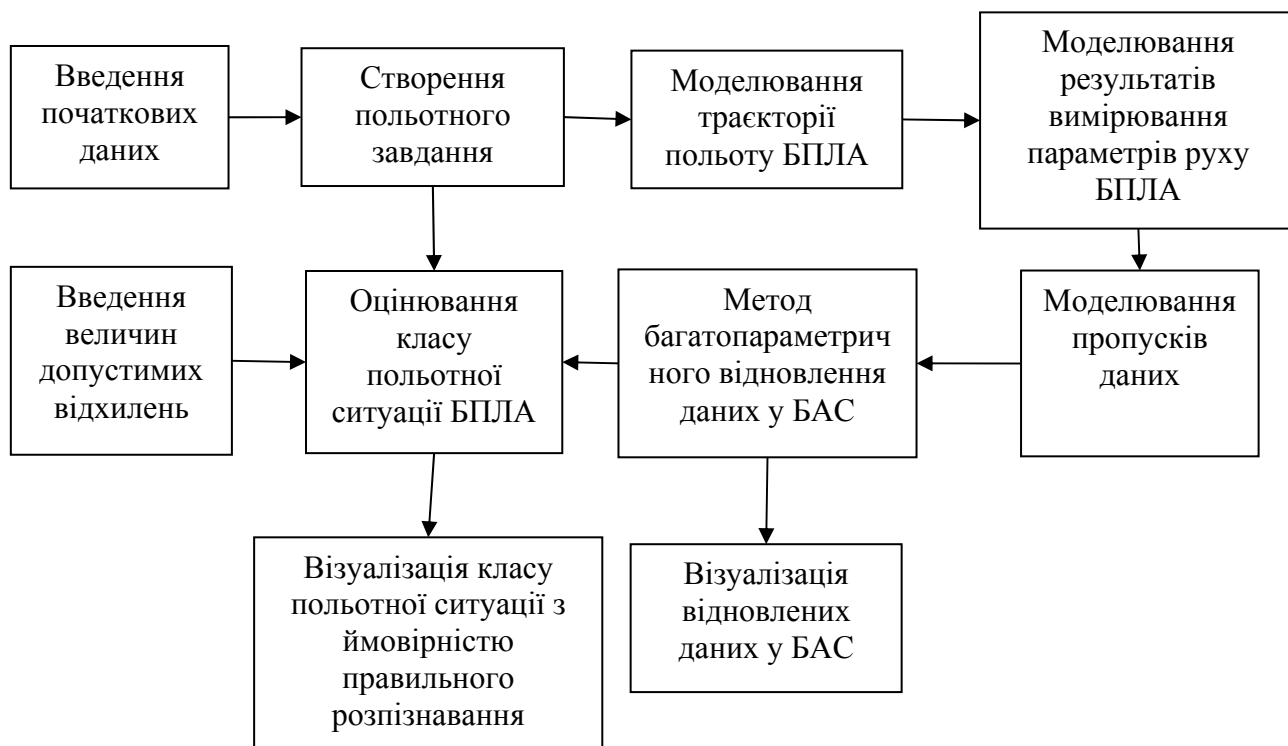


Рис. 4.7. Структурна схема програмного забезпечення

Польотне завдання моделюється у локальній системі координат NED (*North-East-Down*). Початок системи координат (рис. 4.8) розміщується на поверхні еліпсоїду ($WGS\ 84$). Вісь X – спрямована на Північ (геодезична північ) по дотичній до еліпсоїда. Вісь Y – спрямована на Схід (геодезичний схід). Вісь Z – вниз перпендикулярно до поверхні еліпсоїда.

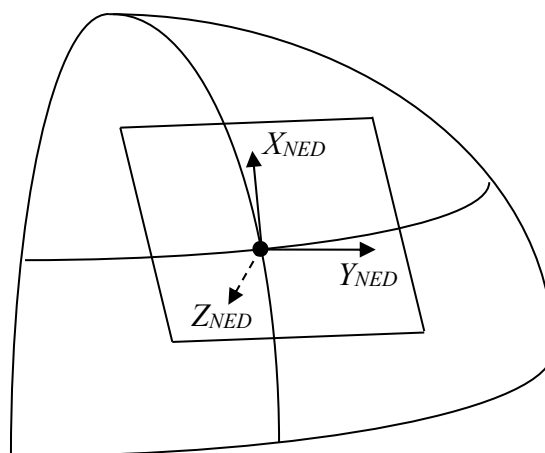


Рис. 4.8. Локальна система координат NED

Координати точки початку NED системи координат вибираються довільним чином. Вихідними даними для моделювання було початкове місцеположення БПЛА, швидкість руху V , та кути курсу ψ та тангажа θ .

Моделювання запланованої траєкторії руху виконувалось за формулою[100]:

$$P_{NED}(t) = P_{NED}(t-1) + V \begin{bmatrix} \cos(\theta)\cos(\psi) \\ \cos(\theta)\sin(\psi) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix},$$

де $P_{NED}(t) = \begin{bmatrix} x_{NED}(t) \\ y_{NED}(t) \\ z_{NED}(t) \end{bmatrix}$ – матриця координат місцеположення БПЛА у момент часу t .

Моделювання вимірювання місцеположення БПЛА виконується у глобальній системі координат $ECEF$ (Earth-Centered Earth-Fixed). Декартова система координат $ECEF$ обертається разом з Землею навколо її осі обертання та визначається через координати x, y, z . (рис. 4.9)

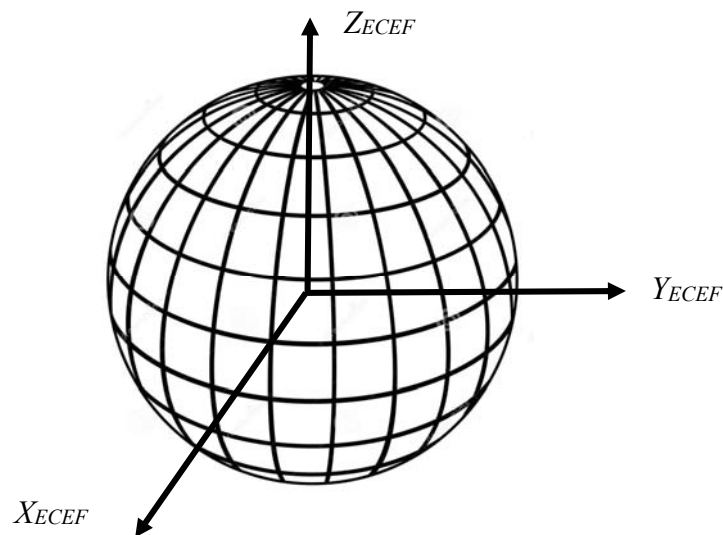


Рис. 4.9. Декартова система координат $ECEF$

Початок системи координат розміщується в центрі мас Землі. Вісь Z – співпадає з віссю обертання Землі та спрямована на Північний полюс. Вісь X – вісь, виходить з центра мас Землі та проходить крізь точку перетину екватора та нульового меридіану. Вісь Y доповнює ортогональну систему координат.

Для подальших обчислень координати місцеположення переводяться з локальної до глобальної системи координат за [100]:

$$P_{ECEF} = P_{NED} R_{ECEF/NED}^{-1} + P_{ECEF,ref},$$

де $P_{ECEF,ref}$ – координати місцеположення NED системи координат в координатній системі $ECEF$;

$R_{ECEF/NED}$ – трансформуюча матриця з NED в $ECEF$ систему координат, вигляду:

$$R_{NED/ECEF} = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_{ref} \cos \lambda_{ref} & -\sin \varphi_{ref} \sin \lambda_{ref} & \cos \varphi_{ref} \\ -\sin \lambda_{ref} & \cos \lambda_{ref} & 0 \\ -\cos \varphi_{ref} \cos \lambda_{ref} & -\cos \varphi_{ref} \sin \lambda_{ref} & \sin \varphi_{ref} \end{bmatrix},$$

де λ_{ref} та φ_{ref} – геодезична довгота та широта місцеположення NED системи координат в координатній системі $ECEF$.

Отримана матриця координат P_{ECEF} відображає заплановану траєкторію руху БПЛА.

Дослідження впливу тимчасових відхилень від плану польоту виконується шляхом зміни кутів курсу чи тангажа. Подібні відхилення цілком можуть мати місце у наслідок помилок оператора БАС під час пілотування або у випадку невірного програмування плану польоту. Моделювання вимірювань координат місцеположення БПЛА (P_{ECEF}) виконаємо з припущенням розподілу похибок вимірювань за нормальним законом $N(M, \sigma^2)$, з математичним сподіванням, що відповідатиме запланованій траєкторії руху та середньо-квадратичному відхиленню що відповідає похибці вимірювального обладнання.

Змодельовані дані вимірювань траєкторії польоту БПЛА подаються на модуль, що реалізує багатопараметричне відновлення польотних даних для відновлення втрачених даних. Критерій втрачених даних формується за допомогою матриці справності параметрів (H). Елементи матриці H можуть містити дані виключно у двійковій системі числення, причому логічному «0» – відповідає справність певного параметра у певний час а логічній «1» – невірному значенню. Далі задача відновлення даних полягає у відновленні даних

у періоди часу, коли вимірювальне обладнання видавало невірні значення вимірювань координат місцеположення БПЛА.

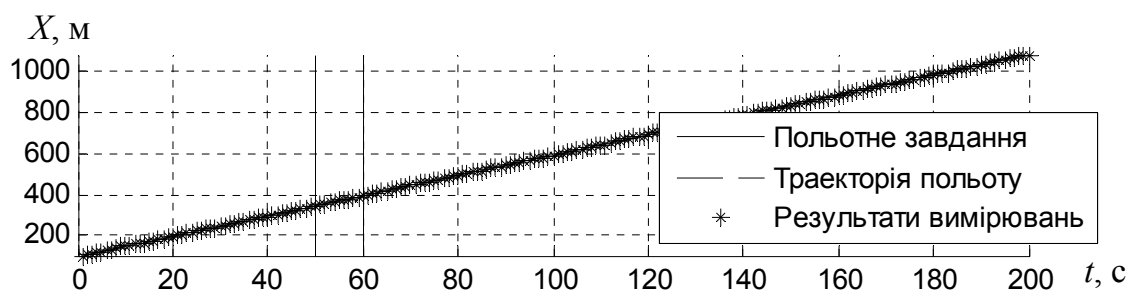
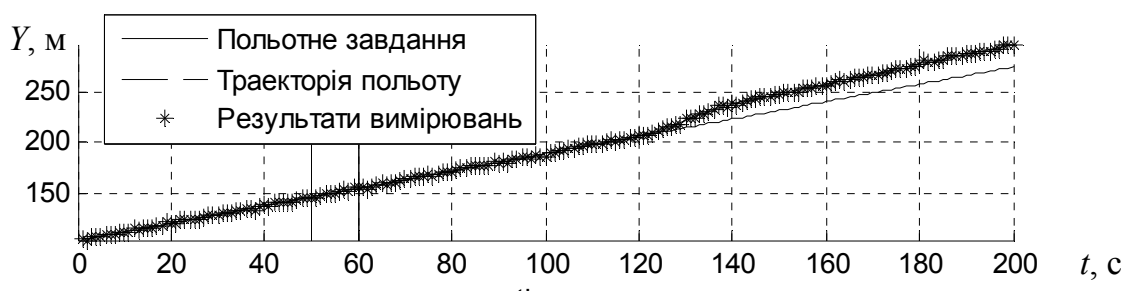
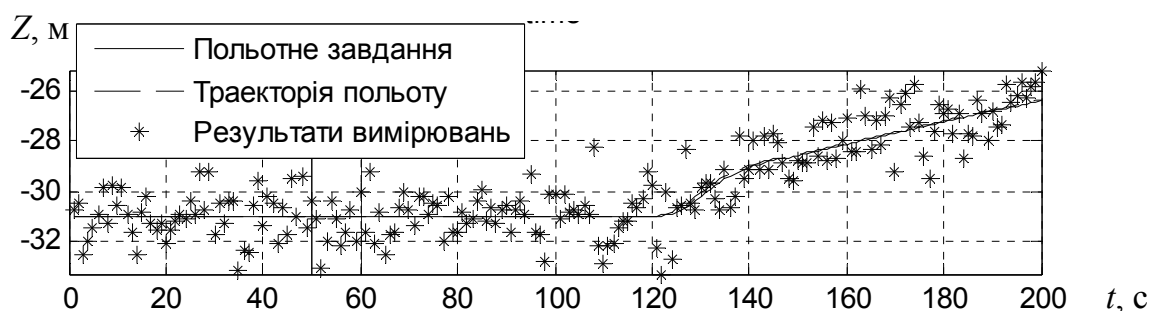
Відновлення втрачених даних виконується за багатопараметричним методом з урахуванням всіх наявних даних для кожного з параметрів. Відновлені таким чином дані поєднуються з наявними даними та утворюють «повні» дані. Координати запланованої та реальної траєкторії руху використовуються для розрахунку відхилень у кожний момент часу:

$$D(t) = \sqrt{(x_{ECEF}(t) - x_{ECEF_r}(t))^2 + (y_{ECEF}(t) - y_{ECEF_r}(t))^2 + (z_{ECEF}(t) - z_{ECEF_r}(t))^2} \quad (4.1)$$

Величини наявних відхилень порівнюються з метрикою класів ситуацій при багатоальтернативній класифікації польотних ситуацій з розрахунком ймовірності оцінювання. Метрика класів ситуацій розраховується у відповідності з порядком описаним у п.п.3.2 (стор. 94), виходячи з заданих меж максимально-допустимого відхилення для певного проміжку часу. На заключному етапі будуються відповідні графіки для візуалізації отриманих результатів.

4.2.2. Результати комп'ютерного моделювання

Початок *NED* системи координат було розміщено у точці з широтою 50.274745°N, довготою 30.539358°E та висотою 92 м, що відповідають місцеположенню полігону для випробувань БПЛА. Під час моделювання шляхова швидкість польоту БПЛА була сталою величиною та відповідала 5м/с. Для дослідження результатів багатоальтернативної класифікації було введено відхилення БПЛА від запланованої траєкторії руху шляхом зміну курсу починаючи з 120 с. польоту. Дослідження польоту виконувалось у горизонтальній площині, тому кут тангажа під час моделювання польоту був сталим та дорівнював 0°. Відповідно до початкових даних політ виконувався на висоті 31м. Похибка системи позиціонування під час моделювання теж була сталою величиною та складала 2м. Результати комп'ютерного моделювання траєкторії руху БПЛА наведено на рис. 4.10 – рис. 4.12 .

Рис. 4.10. Результати моделювання координати X Рис. 4.11. Результати моделювання координати Y Рис. 4.12. Результати моделювання координати Z

Для дослідження характеристик відновлення даних було змодельована сигнал справності системи позиціонування рис. 4.13. Проміжок втрачених даних склав 10с, що почався з 50 с польоту та закінчився 60 с. Відповідно до проміжку втрачених даних дані на рис. 4.10 – рис. 4.12 є недостовірними чи втраченими.

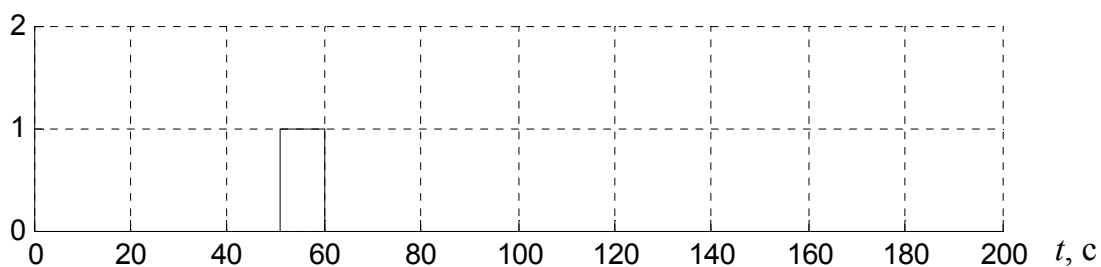


Рис. 4.13. Результат моделювання сигналу справності системи позиціонування

Проміжок втрачених даних було використано для відновлення значень відповідних параметрів за методом багатопараметричного відновлення втрачених даних. Результати відновлення даних на проміжку від 50с до 60с польоту наведено на рис. 4.14 – рис. 4.16.

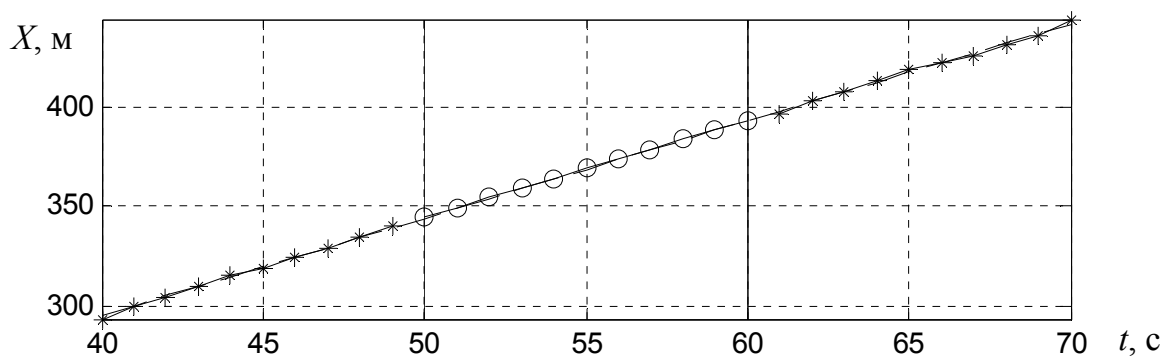


Рис. 4.14. Результати відновлення даних за координатою X

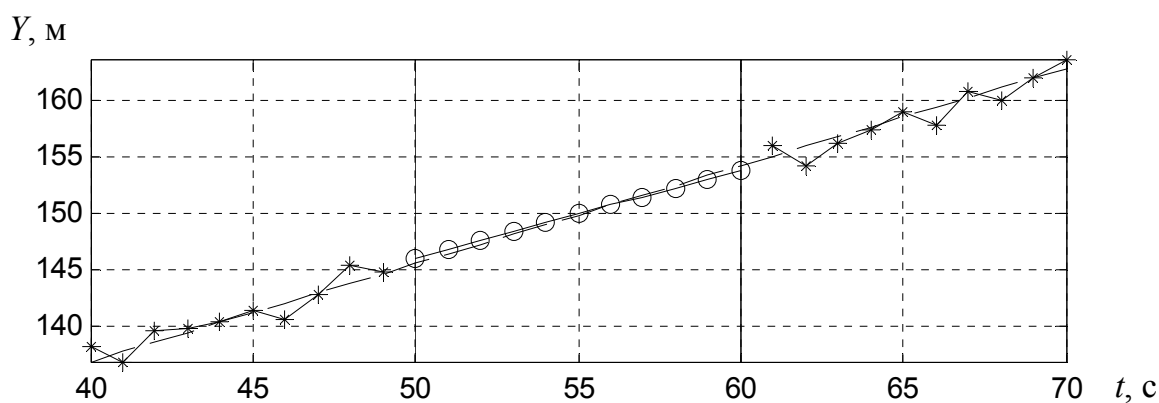


Рис. 4.15. Результати відновлення даних за координатою Y

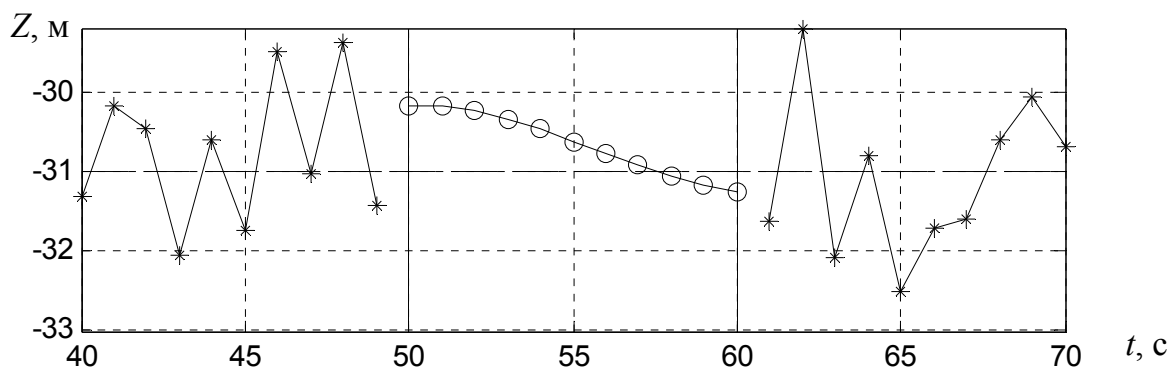


Рис. 4.16. Результати відновлення даних за координатою Z

Похибки відновлення втрачених даних розраховані для кожного з параметрів наведені на рис. 4.17. У загальному випадку похибки відновлення даних не перевищували 2.7 м.

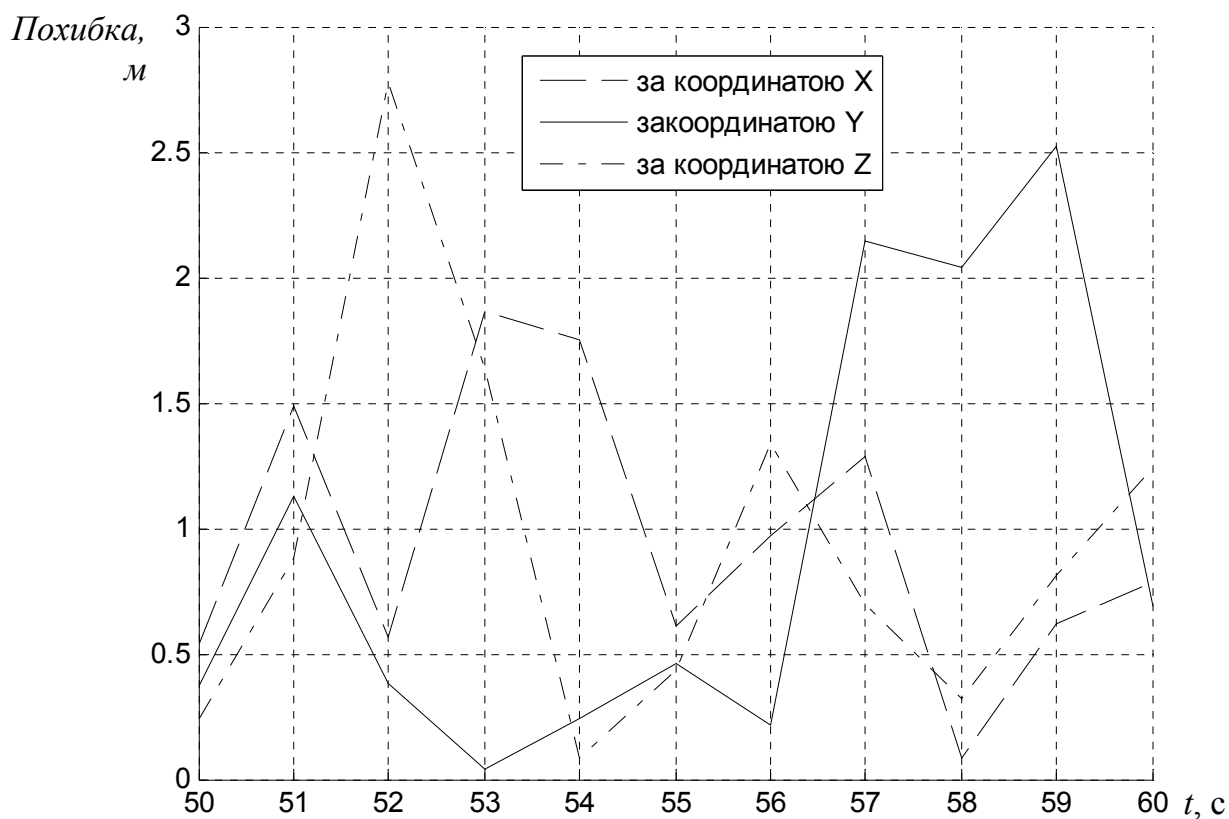


Рис. 4.17. Похибки відновлення координат місцеположення

Для проведення багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій БПЛА було використано величину відхилення від запланованої траєкторії руху розраховану за (4.1). Результати розрахунку меж відхилення наведені на рис. 4.18, а результати класифікації польотних ситуацій на рис. 4.19. Ймовірності розпізнавання наявного класу ситуації обчислені за (3.1) представлені на рис. 4.20.

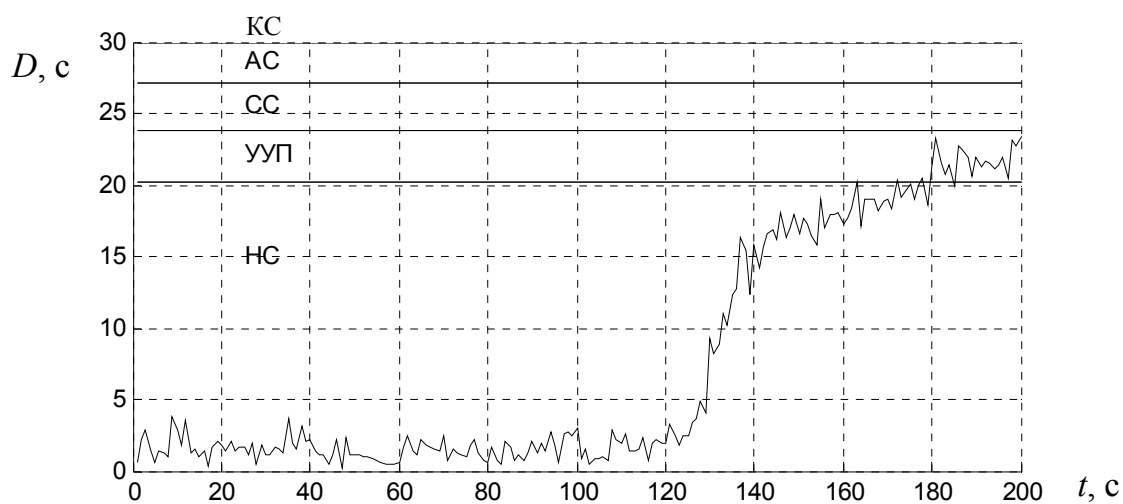


Рис. 4.18. Відхилення БПЛА від запланованої траєкторії руху

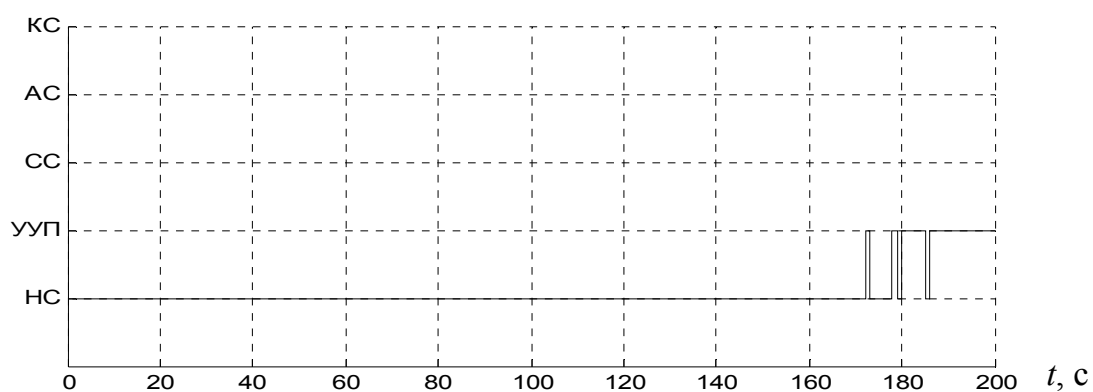


Рис. 4.19. Результати розпізнавання класу польотної ситуації

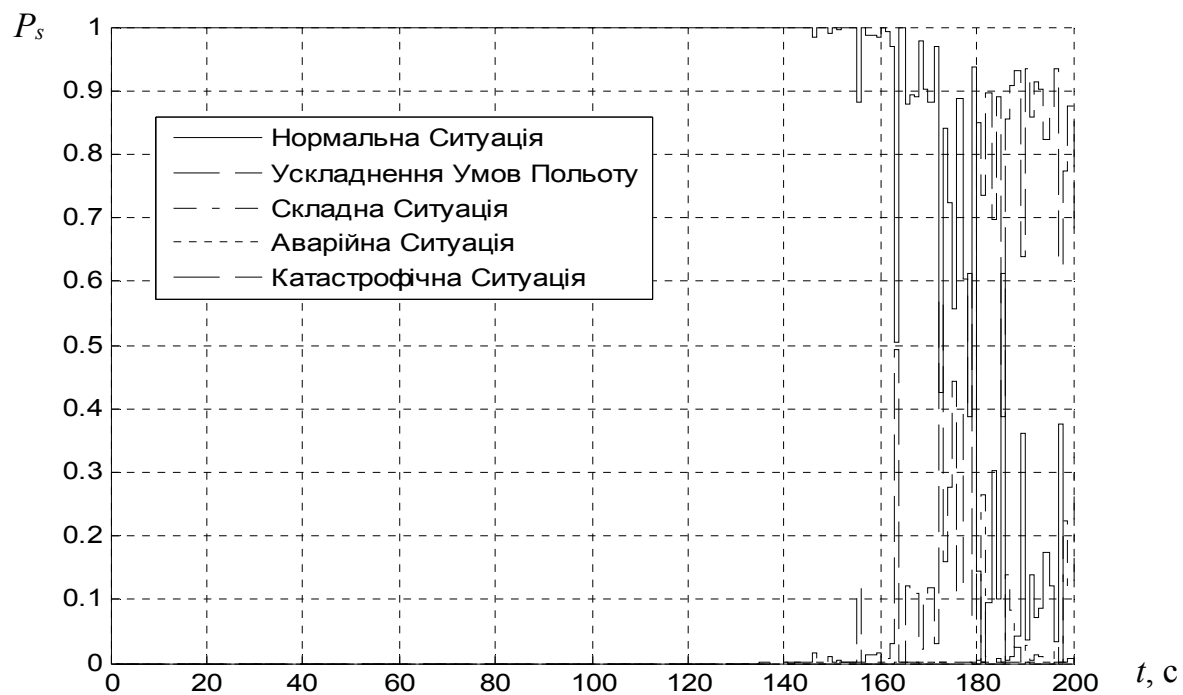


Рис. 4.20. Результати оцінювання ймовірності появи певного класу ситуації

Для верифікації отриманих результатів відновлення втрачених параметрів було виконано порівняння запропонованого методу багатопараметричного відновлення даних з результатами відновлення втрачених даних за поліномом та сплайнами за кожним з параметрів окремо. Результати похибок відновлення наведено на рис. 4.21.

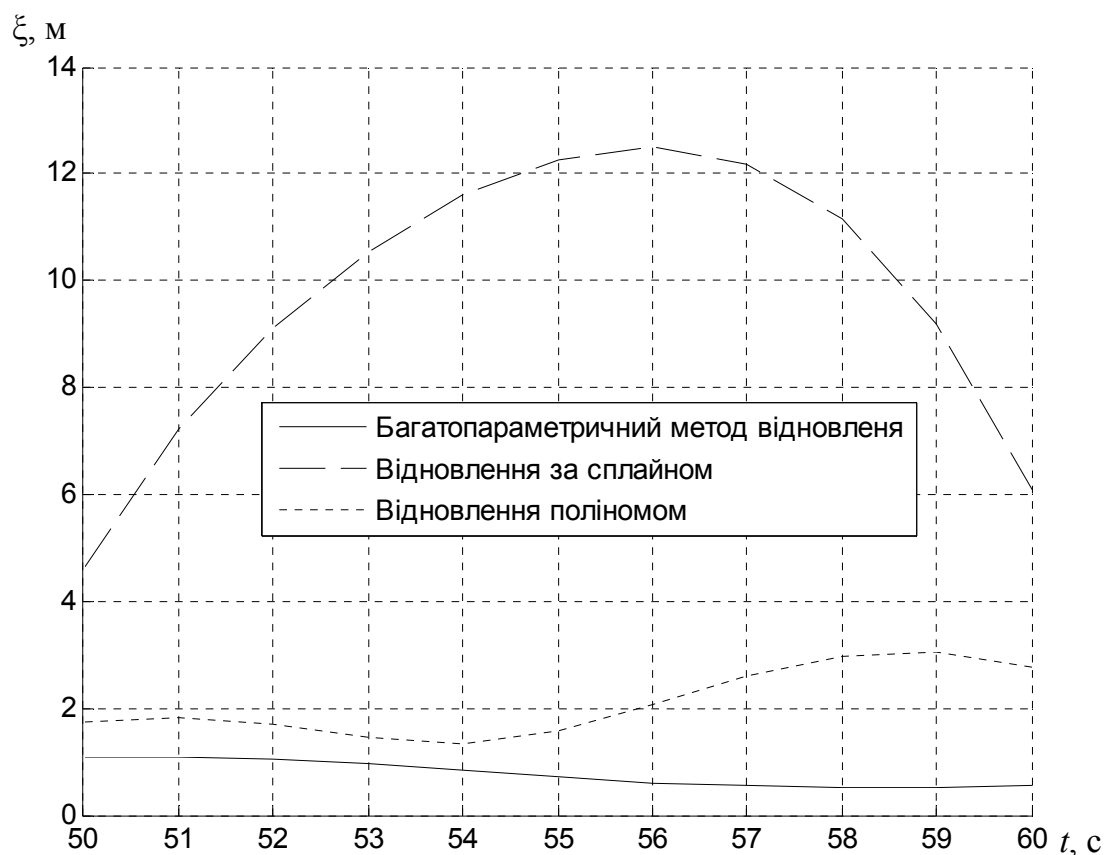


Рис. 4.21. Похибка відновлення даних в залежності від методу

Загалом характеристики відновлення втрачених даних сильно залежать від проміжку відновлення, тобто часу відсутності даних та наявних параметрів польоту БПЛА. Відповідно до цього виконано дослідження середнього значення похибки відновлення даних від розміру пропуску даних. Результати моделювання за методом Монте-Карло (наведено на рис. 4.22) вказують на ефективне відновлення втрачених даних при малих значеннях проміжку пропусків.

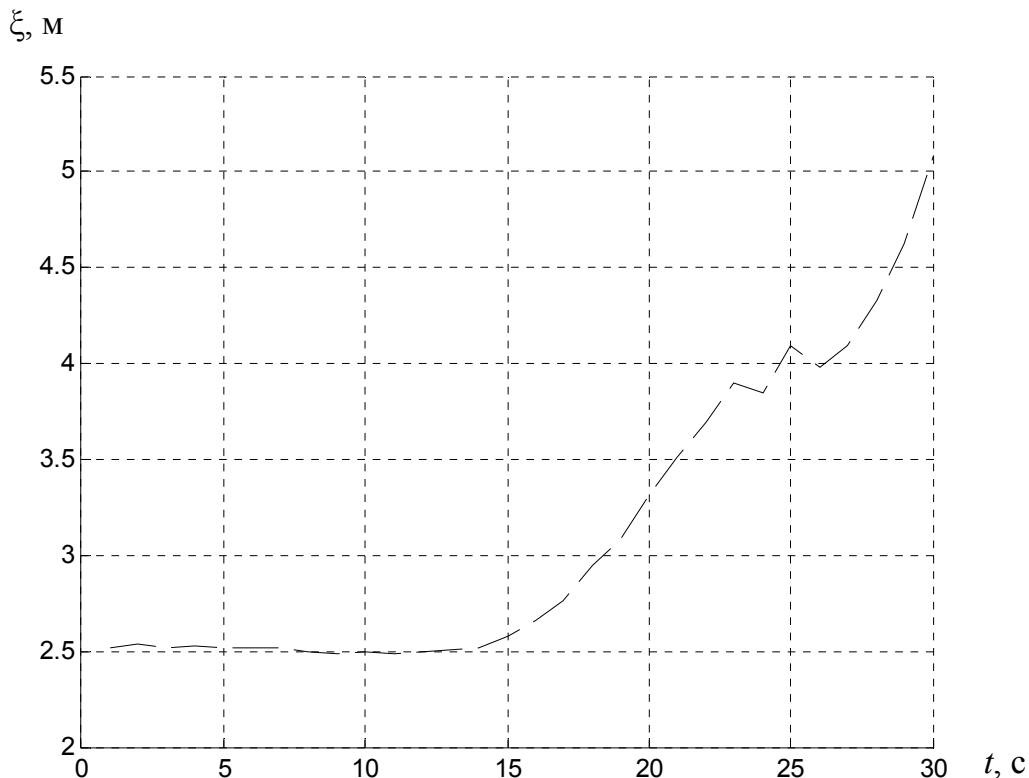


Рис. 4.22. Середнє значення похибки відновлення даних від розміру пропуску

4.3. Апробація методів шляхом експериментальних випробувань

4.3.1. Опис експерименту

Для дослідження функціонування методу багатопараметричного відновлення польотних даних у реальних умовах було поставлено експеримент на полігоні «Ходосівка» з координатами 50.27° північної широти та 30.53° східної довготи за підтримки «Аерокосмічного центру» НАУ. Отримані під час експерименту польотні дані є основою для дослідження точності виконання траєкторних завдань, що ставилися перед польотом.

Суть експерименту полягала у розгортанні БАС та виконанні кількох польотів БПЛА з повною фіксацією параметрів для подальшого аналізу, відновлення втрачених та коригування аномальних даних, а також візуалізації виконання заданого польотного завдання та класу наявної польотної ситуації з урахуванням відновлених даних.

Загальна структурна схема БАС, що приймала участь у експерименті зображена на рис. 4.23.

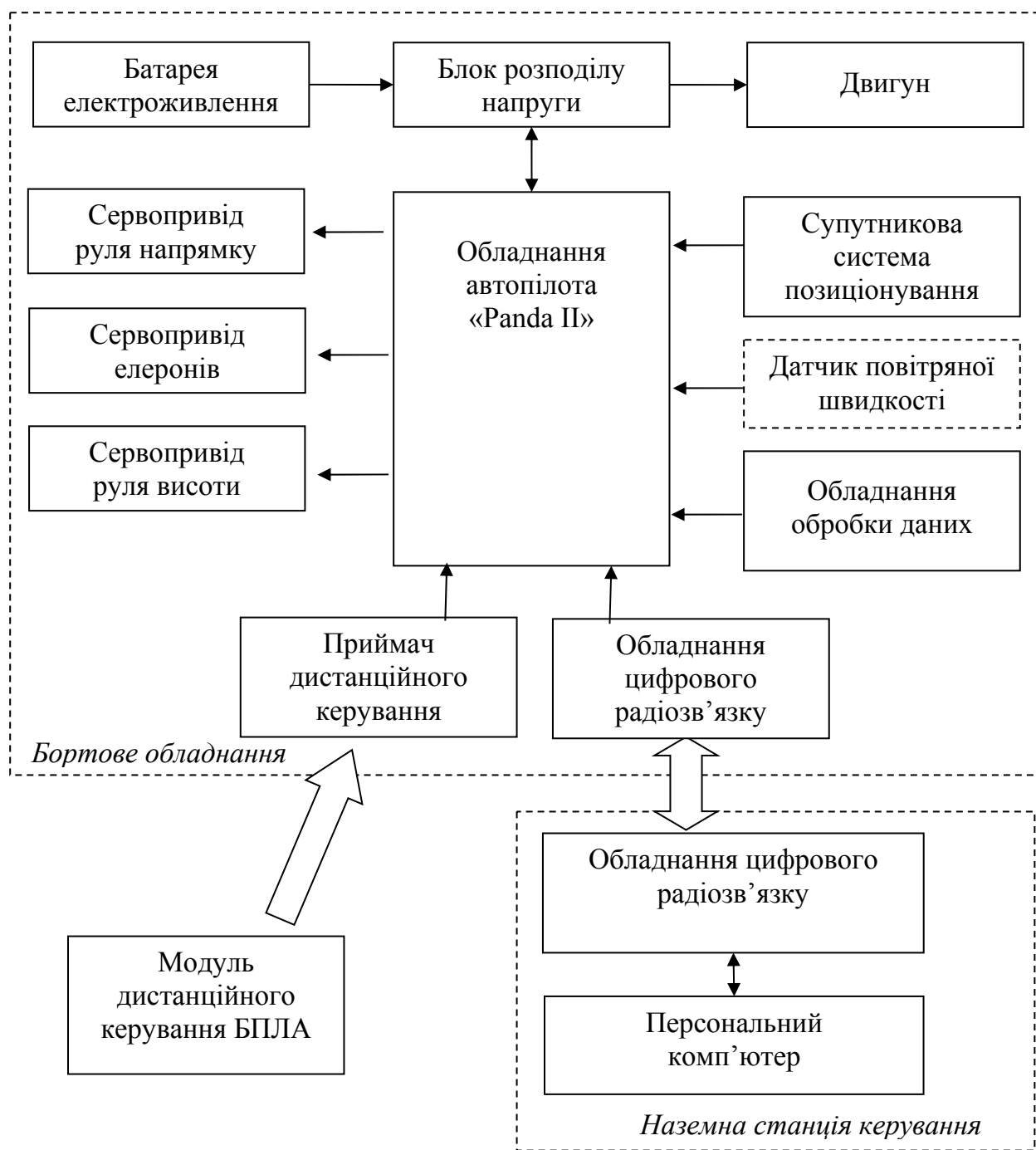


Рис. 4.23. Загальна структурна схема БАС

Під час експерименту польотні дані фіксувалися з частотою 1 Гц. Аналіз динамічних параметрів БПЛА потребує фіксації з більшою частотою, проте наявна забезпечує фіксацію загальних тенденцій для повільно змінних параметрів (курс, висота). Під час експерименту керування БПЛА забезпечувало наступні функціональні можливості:

- формування польотного завдання з прив'язкою координат на основі картографічних даних, що відображаються оператору за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення на НСК;

- бездротове завантаження польотного завдання через модуль цифрового обладнання радіозв'язку;

- дистанційне керування режимом польоту;

- відображення параметрів польоту на індикаторах, відображення координат БПЛА на карті місцевості;

- оперативна зміна польотного завдання.

Для максимального зменшення ризику втрати БПЛА чи пошкодження апаратури експериментальні польоти виконувались по двоканальній схемі керування. Режими польоту перемикалися ручним пультом без використання радіоканалу цифрового зв'язку. НСК використовувався лише для контролю та реєстрації польотних параметрів (рис. 4.24). Траєкторії польотних завдань планувалися без виходу за межі візуального спостереження та без польотів над горами, населеними пунктами та окремими спорудами. Висота польоту вибиралась нижче межі контрольованого повітряного простору (300м). Польоти виконувалися в ясну погоду з швидкістю вітру до 2 м/с.

Програма польотів включала наступні етапи:

- старт з руки в режимі ручного керування;

- набір висоти в режимі ручного керування;

- перехід в режим стабілізації;

- перехід в режим автоматичного польоту по заздалегідь запрограмованим контрольним точкам;

- перехід в режим стабілізації;

- посадка на ґрунт.



Рис. 4.24. Наземна станція керування

Під час експерименту використовувався БПЛА «Cessna N877S», укомплектований бортовою апаратурою «Panda-II» (рис. 4.25). Польотні дані передавалися по радіоканалу на НСК та оброблялися у режимі реального часу у спеціалізованому програмному забезпеченні «GCS for Panda-II».

Основні характеристики БПЛА «Cessna N877S» наведені у табл. 4.2.

Таблиця. 4.2 – Основні характеристики БПЛА «Cessna N877S»

Характеристика	Величина
Маса	910 г
Довжина	965 мм
Розмах крила	1450 мм
Площа крила	23.3 дм ²
Навантаження на крило	40 г/дм ²



Рис. 4.25. БПЛА «Cessna N877S»

НСК дає можливість встановлювати маршрутні точки, висоту, швидкість польоту та їх зміну під час польоту. Обладнання підтримує можливість використання одного з режимів автоматичного польоту:

- автоматичний політ по колу;
- автоматичне повернення «додому»;
- автоматичний зліт;
- автоматична посадка.

Бортове обладнання «Panda II» забезпечує високу точність вимірів польотних даних шляхом використання інтегрованого 32-бітного мікропроцесора, модуля GPS, три-осьових гіроскопів, акселерометрів та магнітометрів, точному вимірюванню барометричної висоти (2 м).

Відповідно до рис. 4.23 до складу бортового обладнання БПЛА «Cessna N877S» під час експерименту входив контрольний модуль з підключеним модулем GPS, сенсором струму, сенсором повітряної швидкості та радіо модемом з частотою 433 МГц, та дальністю дії до 10 км. Загалом точність позиціонування за GPS у горизонтальній площині склала 2.5 м. Максимальна кількість маршрутних точок для польотного завдання – 98. Швидкість передачі даних – 19200 Б/сек.

НСК складається з ПК зі встановленим ПЗ «GCS for Panda II» та підключеним радіо модемом для формування радіоканалу. Зовнішній вигляд ПЗ «GCS for Panda II» наведено на рис. 4.26.

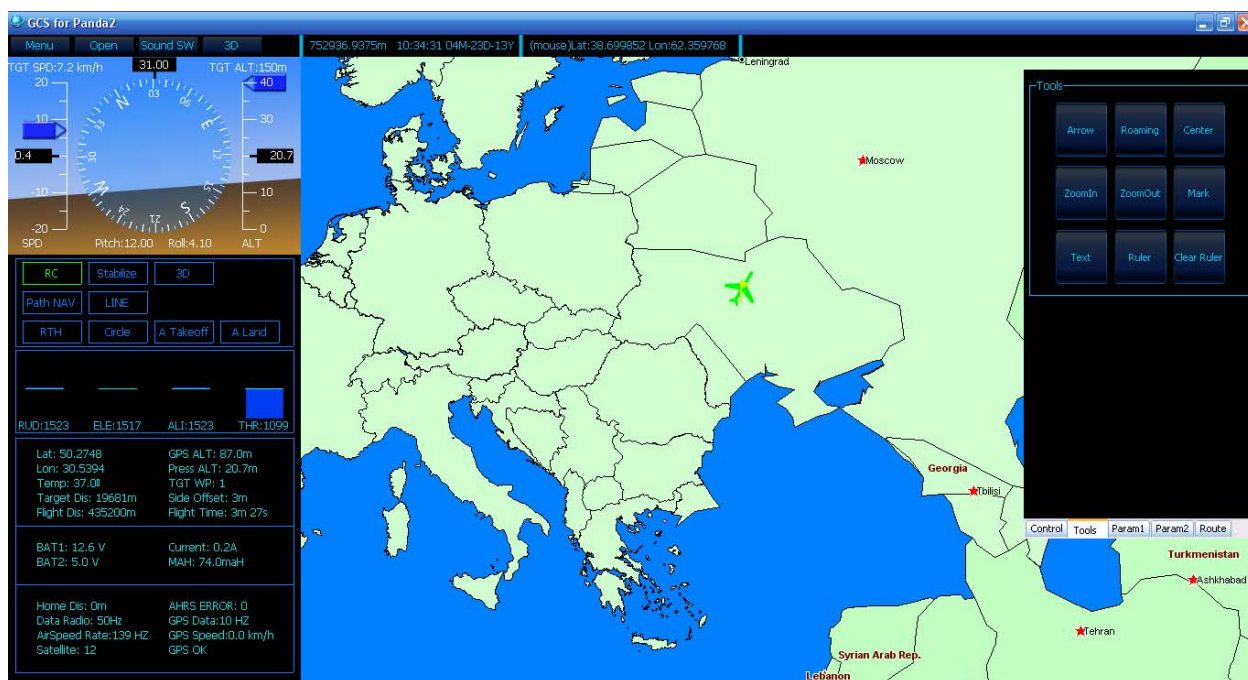


Рис. 4.26. Головне вікно ПЗ «GCS for Panda II»

4.3.2. Результати експериментальних випробувань

Під час експериментального польоту на полігоні «Ходосівка» був виконаний підйом БПЛА на задану висоту та перехід у автоматичний режим польоту за заздалегідь заданою траєкторією руху. Запланована траєкторія руху задавалась у вигляді контрольних точок у ПЗ «GCS for Panda II» перед початком польоту. Координати польоту БПЛА у *NED* системі координат наведено на рис. 4.27 – рис. 4.29. Причому початком системи координат обрано координати першого вимірювання. На рис. 4.30 представлено тривимірну траєкторію руху БПЛА у просторі отриману на основі вимірювань GPS.

У якості пропуску даних довільним чином, було обрано проміжок від 128 с до 133 с польоту у якості недостовірних даних. Інформацію про недостовірні дані було внесено до параметра, що характеризує справність системи позиціонування.

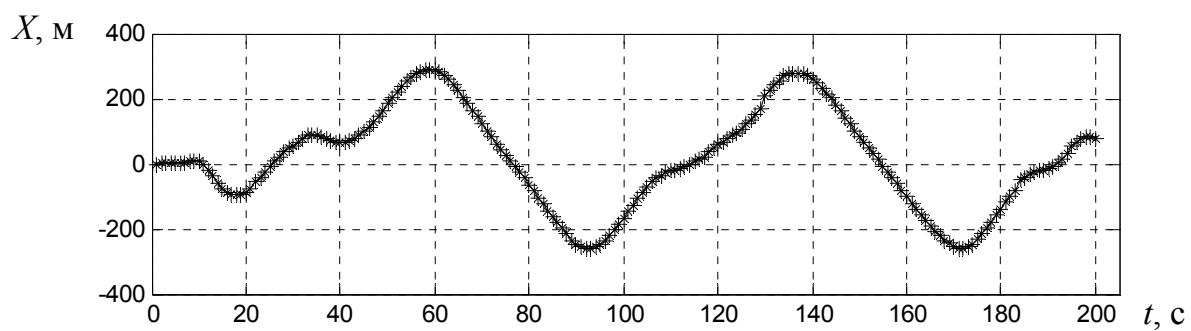
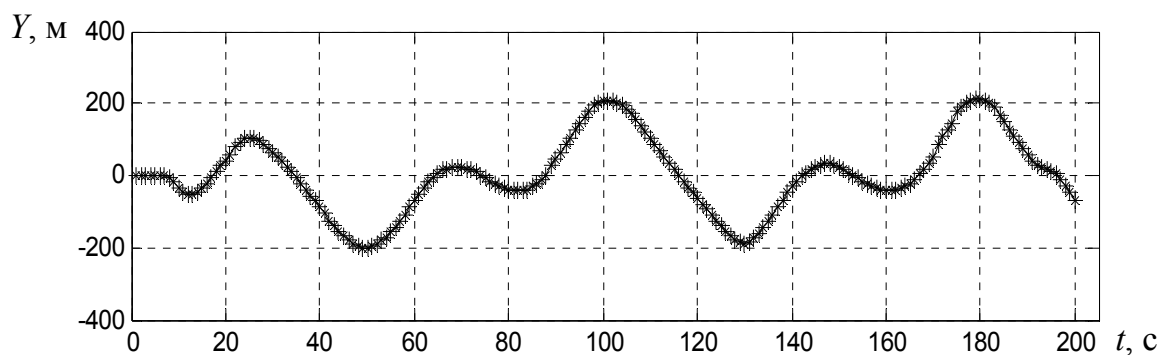
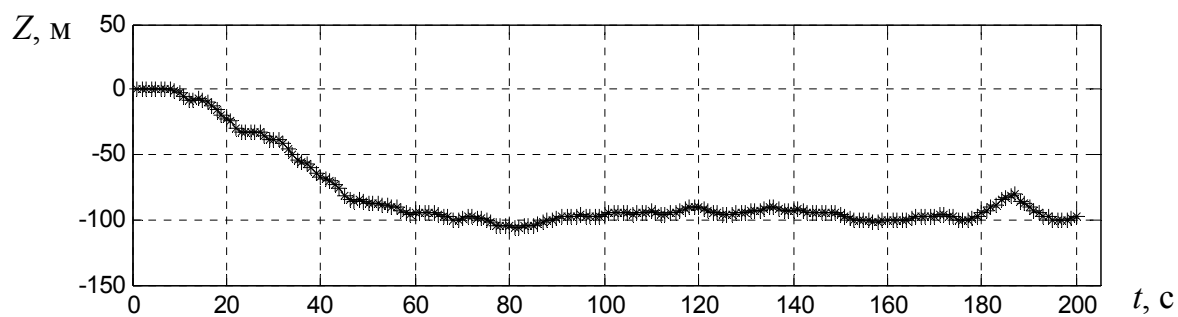
Рис. 4.27. Координата X польоту БПЛАРис. 4.28. Координата Y польоту БПЛАРис. 4.29. Координата Z польоту БПЛА

Рис. 4.30. Траєкторія руху БПЛА

Результати відновлення втрачених даних за багатопараметричним методом відновлення польотної інформації наведено на рис. 4.31 – рис. 4.33. Похибки відновлення даних наведені на рис. 4.34.

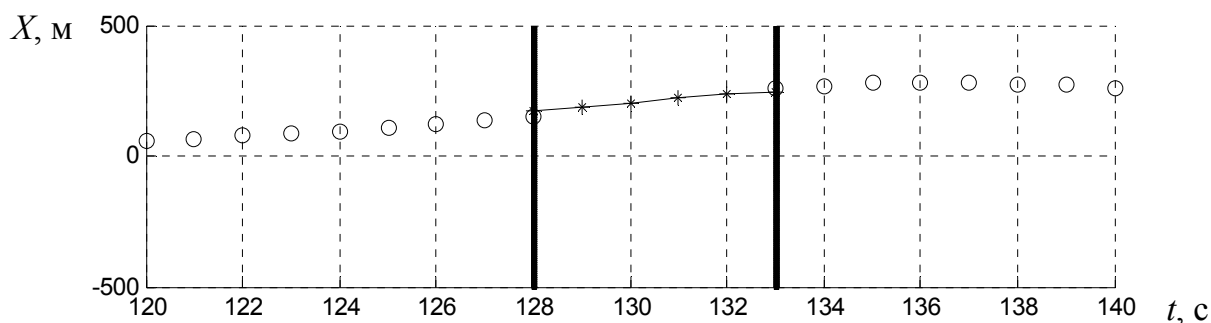


Рис. 4.31. Результати відновлення координати X місцеположення БПЛА

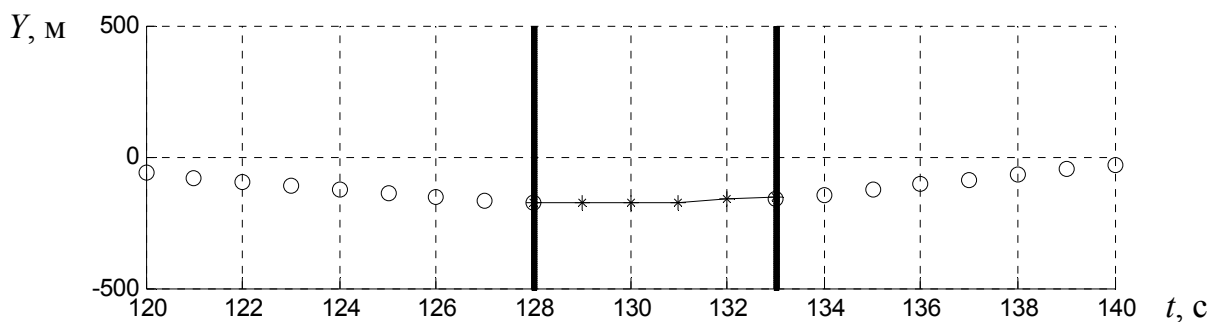


Рис. 4.32. Результати відновлення координати Y місцеположення БПЛА

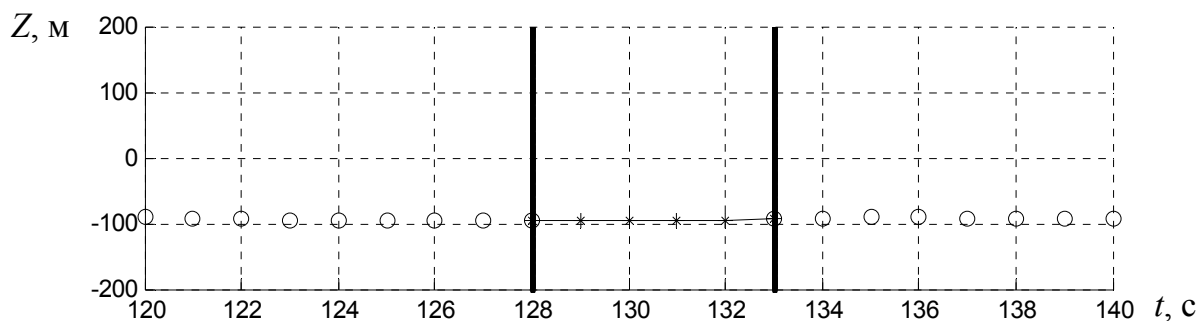


Рис. 4.33. Результати відновлення координати Z місцеположення БПЛА

Величина відхилення від запланованої траєкторії руху наведена на рис. 4.35, а результати багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій на рис. 4.37. Візуалізація польотних ситуацій у тривимірному просторі представлена на рис. 4.36. Оцінені метрики класів ситуацій представляють собою радіус захисного об'єму навколо запланованої траєкторії руху. При цьому, катастрофічна ситуація має лише одне порогове значення та розповсюджується на весь простір навколо. Ймовірність правильного розпізнавання наведена на рис. 4.38. Результати класифікації польотних

ситуацій 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 та особливостями постановки польотного завдання.

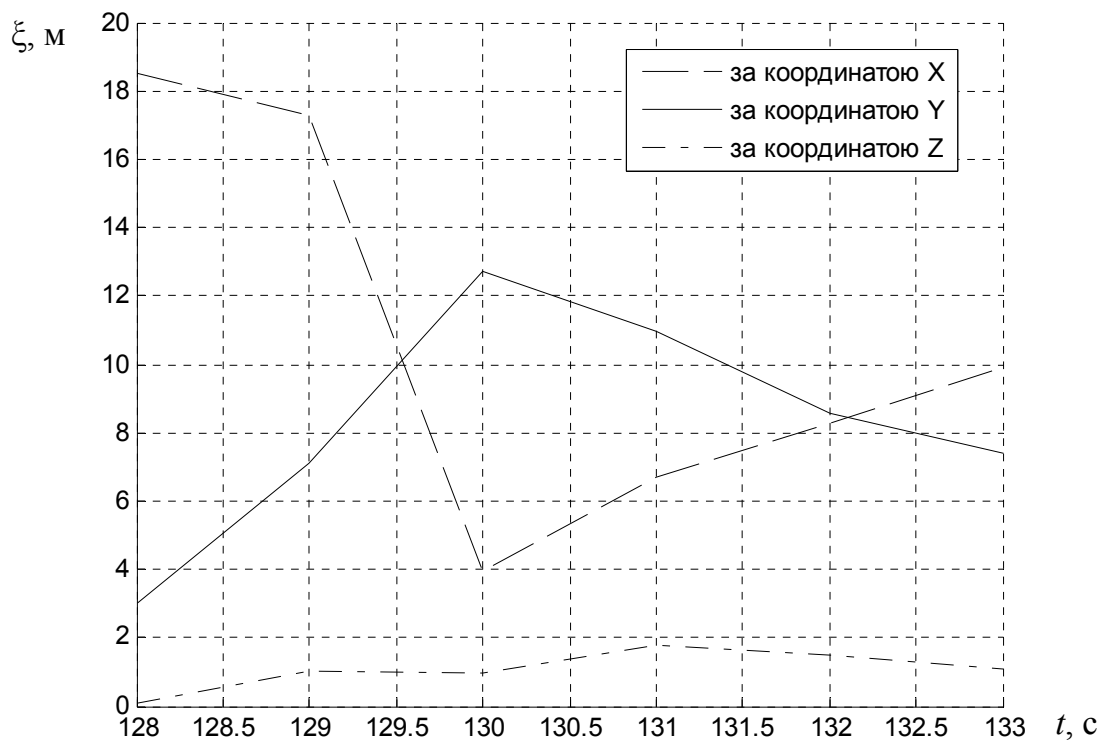


Рис. 4.34. Похибки відновлення координатної інформації

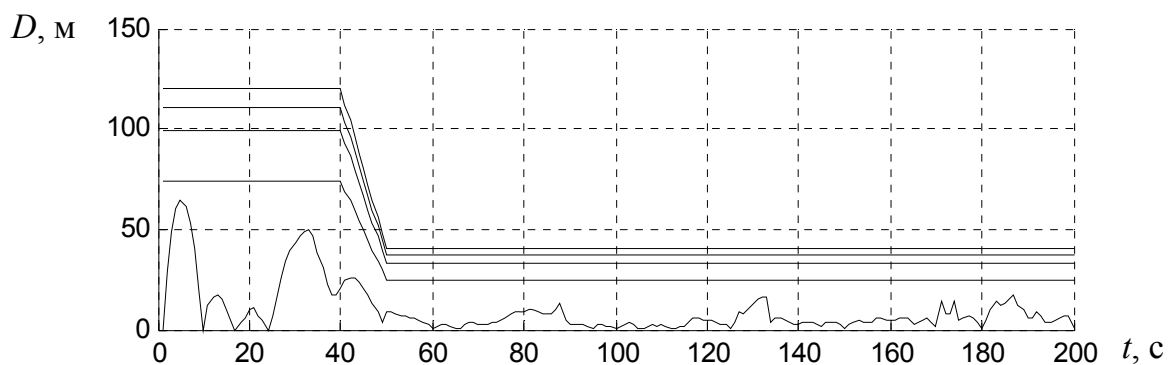


Рис. 4.35. Відхилення від запланованої траєкторії руху

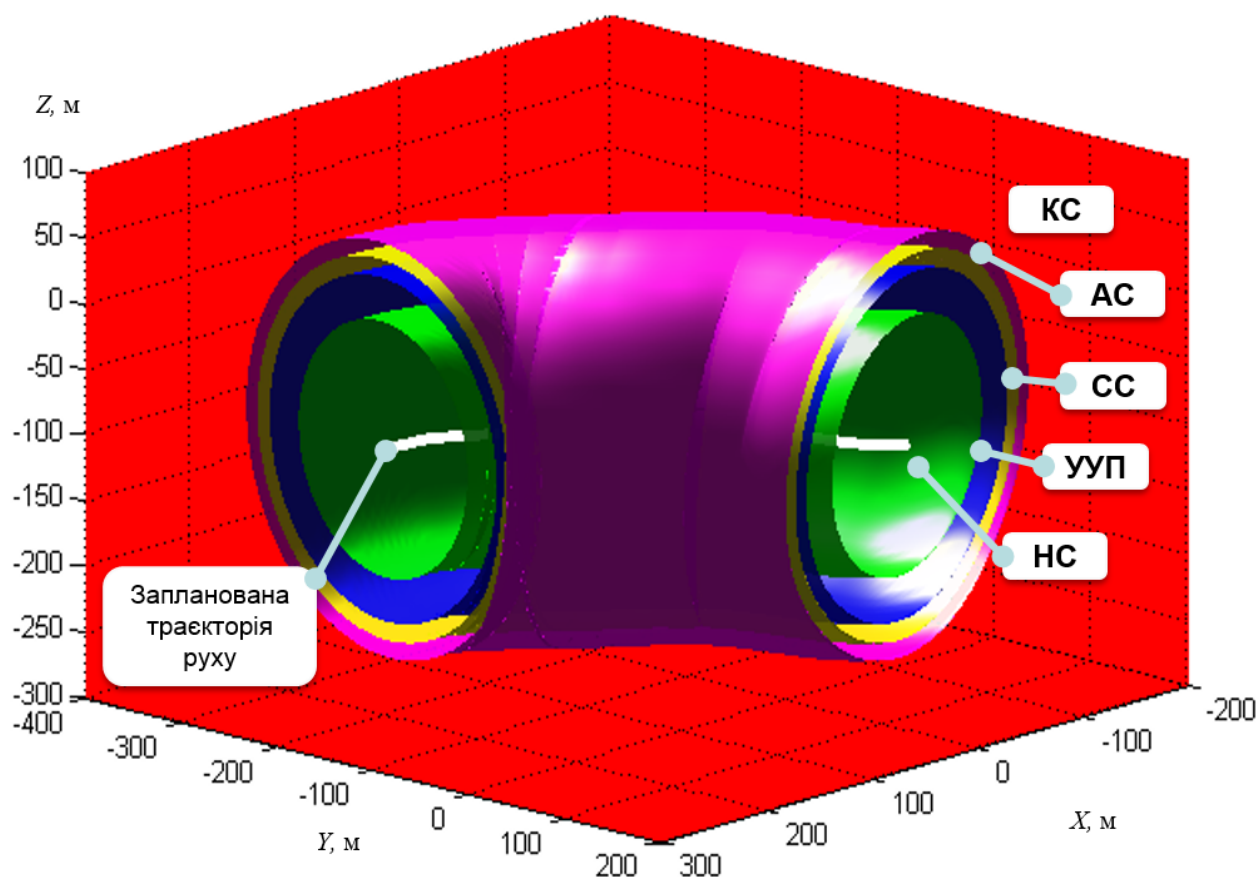


Рис. 4.36. Візуалізація польотних ситуацій у тривимірному просторі

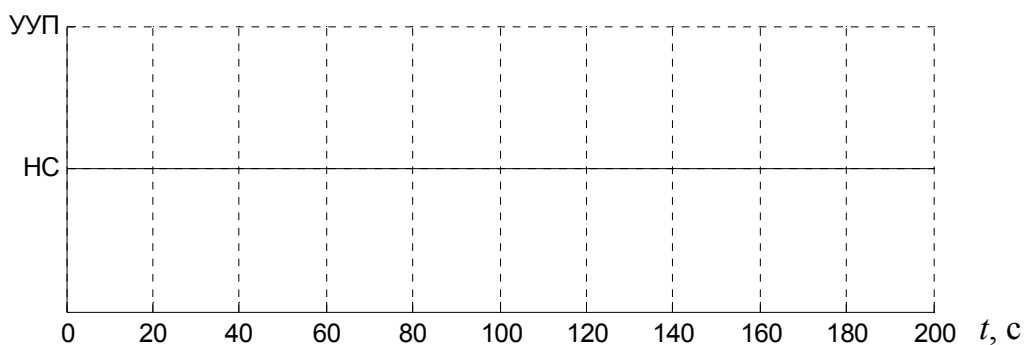


Рис. 4.37. Клас польотної ситуації

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

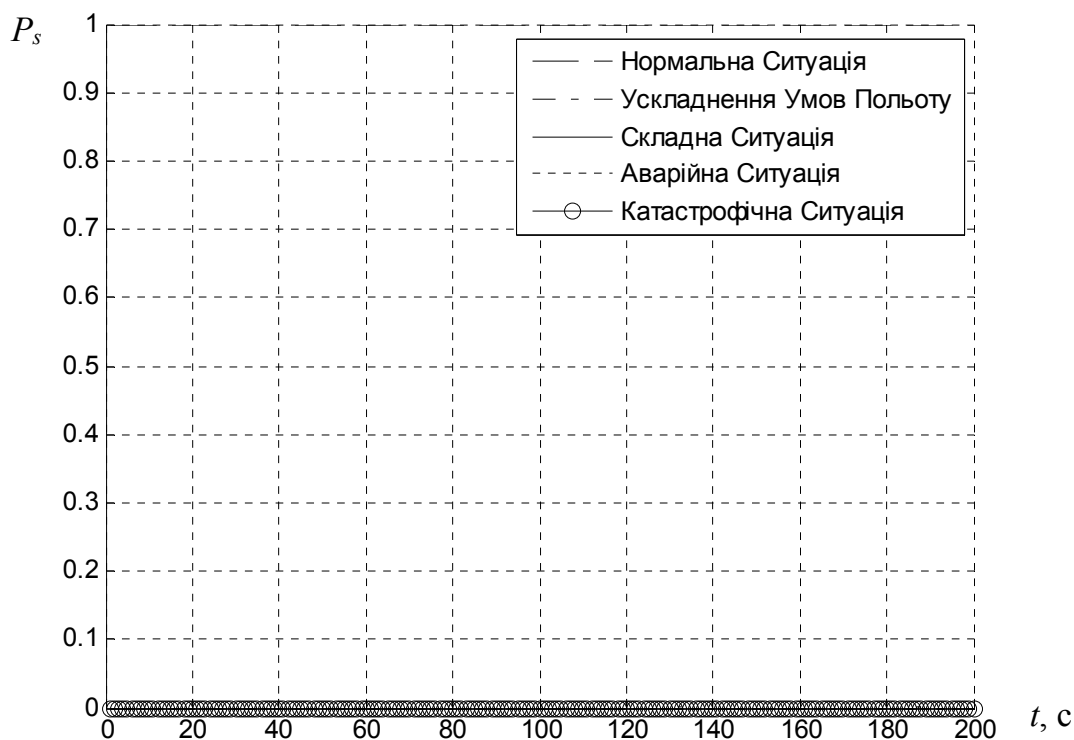


Рис. 4.38. Ймовірності розпізнавання класу польотної ситуації

Ефективність запропонованого методу багатопараметричного відновлення польотних даних підтверджується порівнянням отриманих результатів з результатами застосування інших методів відновлення даних. Зокрема, на рис. 4.39 представлено похибки відновлення втрачених даних по параметру координати X за лінійною, ступінчастою, C^1 та C^2 сплайновими інтерполяціями. Статистичні характеристики отриманих результатів наведено у табл. 4.3.

Порівняння значень середньоквадратичного відхилення, максимального значення похибки відновлення та коефіцієнту детермінації, отриманих за розробленим методом багатопараметричного відновлення даних та інших існуючих методів представлені на рис. 4.40 – 4.42 відповідно.

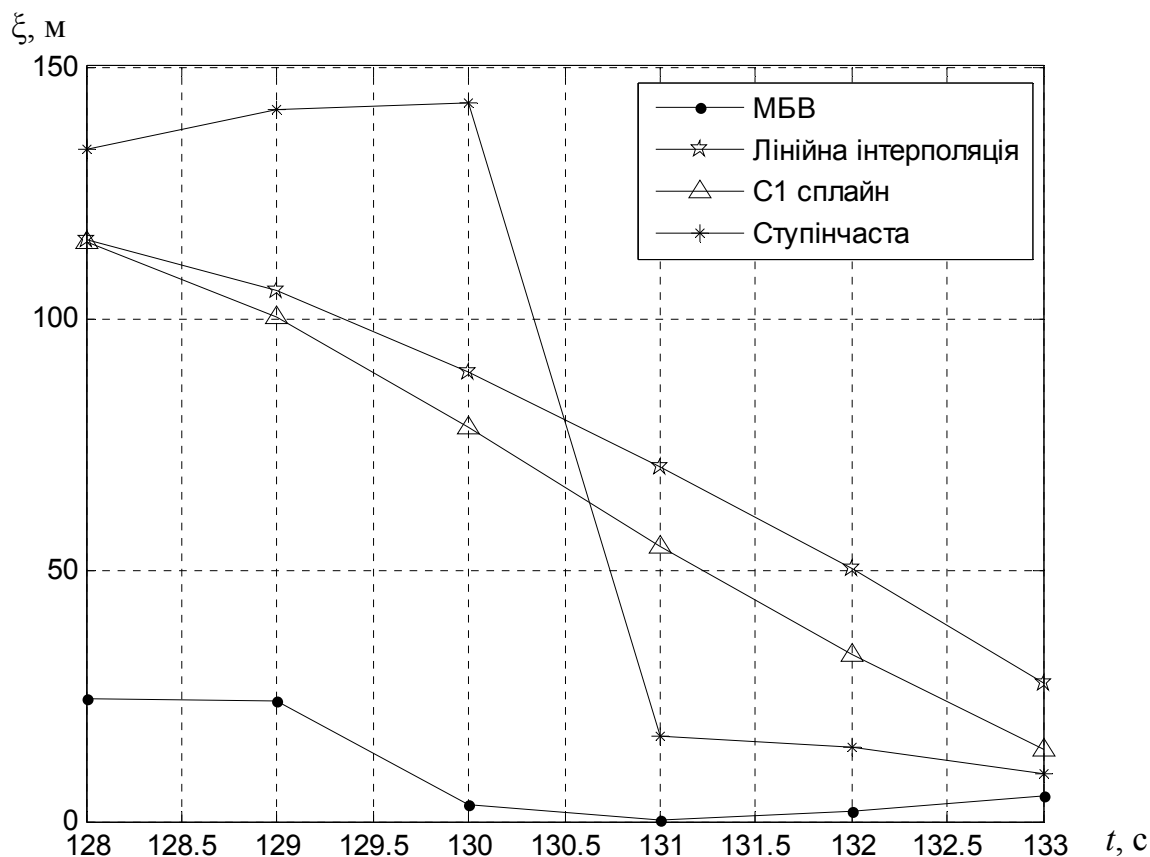


Рис. 4.39. Порівняння запропонованого методу та інших методів відновлення втрачених даних

Таблиця 4.3 – Статистичні характеристики різних методів відновлення даних

Метод відновлення	Середньо-квадратичне 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

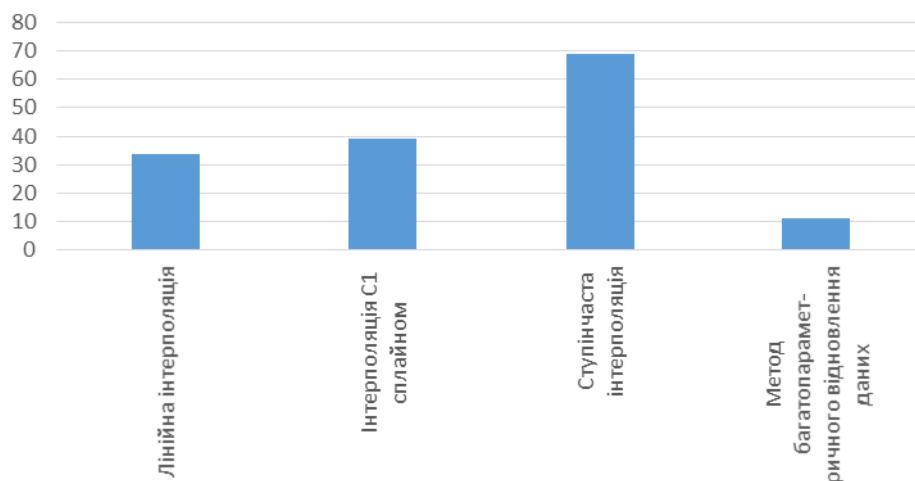


Рис. 4.40. Порівняння середньоквадратичних відхилень

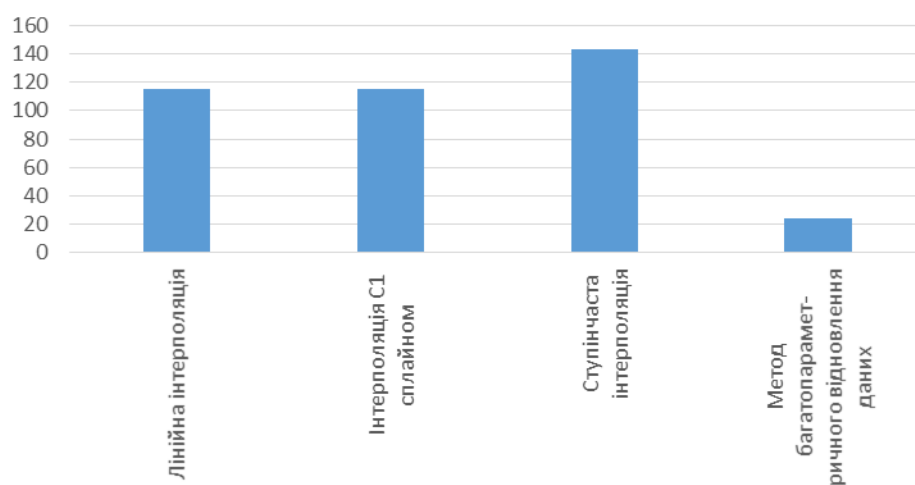


Рис. 4.41. Порівняння максимального значення похибки

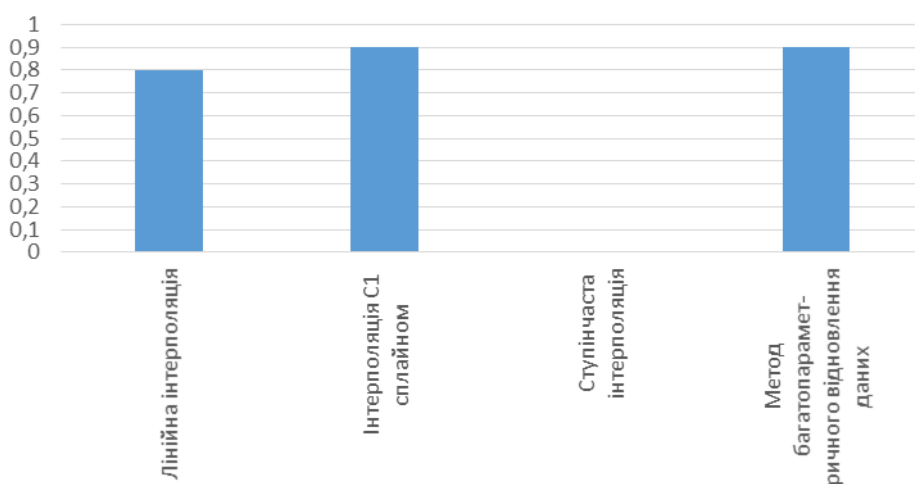


Рис. 4.42. Порівняння коефіцієнту детермінації

Представлені порівняльні результати існуючих методів відновлення з розробленим (рис. 4.40 – 4.42), вказують на доцільність та ефективність використання розробленого методу для відновлення даних у БАС.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для декодування та візуалізації польотних даних на мові програмування MATLAB [1], що дозволяє оператору БПЛА контролювати польотну ситуацію шляхом декодування, обробки та візуалізації польотних даних, які фіксуються в файл засобами наземної станції або в бортовій пам'яті БПЛА. Розроблене ПЗ підтримує найбільш розповсюджені формати збереження та візуалізації даних: «Hornet OSD», «MAV Link», «OPL».

2. Запропоновано спеціально створений програмний комплекс для дослідження процесу відновлення втрачених даних за багатопараметричним методом, що використовує модуль моделювання запланованої траєкторії руху та польоту БПЛА для дослідження впливу ненавмисного відхилення БПЛА від запланованої траєкторії руху, що дозволяє дослідити процес багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій за величинами відхилень від запланованої траєкторії руху.

3. Проведено верифікацію розробленого методу багатопараметричного відновлення польотної інформації за допомогою комп'ютерного моделювання на основі спеціалізованого програмно-алгоритмічного забезпечення. Виконано моделювання руху БПЛА за гомоморфною моделлю та моделювання втрати деяких параметрів БПЛА у певний проміжок часу. Досліджено результати багатоальтернативної класифікації польотної ситуації у проміжки втрати даних та ненавмисного відхилення БПЛА від запланованої траєкторії. Оцінено та проаналізовано похибки відновлення даних, що за результатами комп'ютерного моделювання знаходились у межах нормальної ситуації та не призвели до погіршення польотної ситуації. Результати комп'ютерного моделювання вказують на ефективність та доцільність використання запропонованого методу для відновлення втрачених даних БАС.

4. Скомпоновано БАС для проведення експериментальних досліджень розроблених методів, що складається з БПЛА, наземної станції автоматичного керування та модулю дистанційного керування у ручному режимі.

5. Проведено експериментальні польоти БПЛА для запису різних польотних даних, що реалізують різні польотні завдання. Зокрема, виконано зліт у ручному режимі керування та поступовий перехід у режим стабілізації до автоматичного польоту по заздалегідь запрограмованими контрольними точками у вигляді вісімки. Запропонована траєкторія «вісімка» є доволі складною для виконання, оскільки параметри траєкторії руху швидко змінюються. Це дозволило дослідити відновлення втрачених даних у значно змінюваних параметрах.

6. Виконано декодування записів експериментальних випробувань за розробленим програмним комплексом з формату «Hornet OSD» та досліджено роботу методу багатопараметричного відновлення втрачених даних та аномальних значень. Причому, проміжки втрачених даних вибиралися довільним чином для дослідження характеристик відновлення даних. Результати експериментальних випробувань підтверджують ефективність та доцільність використання запропонованого методу для відновлення втрачених даних БАС.

7. Наведено результати застосування удосконаленого методу багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій БПЛА за величиною відхилення від заздалегідь запланованої траєкторії руху БПЛА з урахуванням відновлених даних вказують на високу ймовірність правильного розпізнавання класу ситуації.

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 вдале 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 величиною 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 за гомоморфною моделлю та моделювання втрати деяких параметрів БПЛА у певні проміжки часу. Досліджено результати

багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій на час втрати даних та ненавмисного 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 на мові програмування MATLAB, 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 на 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 запланованих 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. А. С. 58313 України. Комп'ютерна програма «Програмне забезпечення для декодування та візуалізації польотних даних» / Н. С. Кузьменко, В. П. Харченко. – заявл. від 28.11.2014; опубл. 27.01.15.
3. 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.
4. Андрукович П.Ф. Применение метода главных компонент в практических исследованиях. – М.: Изд-во МГУ, 1973 – вып. 36. – 124 с.
5. Аренс Х. Многомерный дисперсионный анализ / Х. Аренс, Ю. Лейтер. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 230 с.
6. Белонин М. Д. Факторный анализ в геологии / М.Д. Белонин, В.А. Голубева, Г.Т. Скублов. – М.: Недра, 1982. – 269 с.
7. Большаков А. А. Методы обработки многомерных данных и временных рядов / А. А.Большаков, Р.Н. – М., 2007. – 521с.
8. Вальд А. Последовательный анализ / А. Вальд. – М.: Физматгиз, 1960. – 328 с.
9. Демиденко Е. З. Линейная и нелинейная регрессии. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
10. Дубров А. М. Многомерные статистические методы / А. М. Дубров, В. С. Мхитарян, Л. И. Трошин. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 352 с.
11. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральные исчисления / Н. С. Пискунов. – Т.2, 1985. – 560 с.
12. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.
13. Дюрэн В. Кластерный анализ / В. Дюрэн, П. Оделл. – М.: Статистика, 1977. – 128 с.

14. Езекиэл М. Методы анализа корреляций и регрессий / М. Езекиэл, К. А. Фокс. – М.: Статистика, 1966. – 559 с.
15. Злоба Е. Статистические методы восстановления пропущенных данных / Е. Злоба, И. Яцкив // Computer Modeling & New Technologies. – 2004. – №. 6. – С. 55 – 56.
16. Казак В. М. Безпілотні літальні апарати / В. М. Казак, О. В. Самков. – К.: НАУ, 2010. – 320 с.
17. Кузьменко Н.С. Аналіз факторів, що впливають на функціонування безпілотних авіаційних систем // Матеріали XII Міжнар. науково-техн. конф. “АВІА-2015”. – 2015. – С. 8.58–8.61.
18. 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.
19. 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 2011 року. – 2011. – С.17.
20. 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.
21. 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.
22. 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.

23. Литтл Р. Дж. А. Статистический анализ данных с пропусками / Р. Дж. А. Литтл, Д. Б. Рубин. – Москва, "Финансы и статистика", 1991. – 336 с.
24. Лучкова С. В. Алгоритмы и программный комплекс анализа многомерных данных о природных объектах с применением статистического и нечеткого моделирования : дис. ... кандидата технических наук : 05.13.18 / С. В. Лучкова; [Место защиты: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники (ТУСУР) РАН]. – Томск, 2014. – 123 с.
25. 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.
26. 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.
27. Про схвалення стратегії розвитку вітчизняної авіаційної промисловості на період до 2020 року / розпорядження Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2008 р. N 1656-р. – 2008. – 7 с.
28. Про затвердження Правил інформаційного забезпечення системи управління безпекою польотів повітряних суден цивільної авіації України / Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 19 березня 2009 року № 295. – 2009. – 28 с.
29. Распопов В. Я. Микросистемная авионика: учеб. пособие / В. Я. Распопов. – Тула: Гриф и К, 2010. – 248 с.
30. Россиев А. А, Итерационное моделирование неполных данных с помощью многообразий малой размерности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pca.narod.ru/DisRos.htm>, свободный (дата обращения 09.10.2011).
31. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия. 2006. – 383 с.

32. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
33. Славутский Л. А. Основы регистрации данных и планирования эксперимента: уч. пособие / Л. А. Славутский. – М.: Изд-во ЧГУ, 2006. – 200 с.
34. Снитюк В. Е. Эволюционный метод восстановления пропусков в данных / В. Е. Снитюк // Сборник трудов VI-й Межд. конференции «Интеллектуальный анализ информации». – Киев, 2006. – С. 262–271.
35. Сосулин Ю. Г. Теория последовательных решений и её применения / Ю. Г. Сосулин, М. Н. Фишман. – М.: Радио и связь, 1985. – 320 с.
36. Сплایни в цифровій обробці даних і сигналів / [Шелевицкий І.В., Шутко М.О., Шутко В.М., Колганова О.О.]. – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2008. – 232 с.
37. Третьяк Л. Н. Обработка результатов наблюдений / Третьяк Л. Н. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 171 с.
38. Ферстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Ферстер, Б. Ренц. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 302 с.
39. Харман Г. Современный факторный анализ. – М.: Статистика, 1972. – 483 с.
40. Харченко В. П. Многоальтернативный последовательный метод в задачах ситуационного анализа воздушной обстановки / В. П. Харченко, Г. Г. Косенко // Моделирование радиоэлектронных систем и комплексов обеспечения полётов: сб. науч. тр. – К.: КМУГА, 1996. – С. 3–10.
41. Харченко В. П. Проблемы развития и методы управления эффективностью систем аэронавигационного обслуживания: дис. доктора тех. наук: 05.22.13 / В. П. Харченко. – К., 1994. – 448 с.
42. Харченко В. П. Авіоніка безпілотних літальних апаратів / В. П. Харченко, В. І. Чепіженко, А. А. Тунік, С. В. Павлова; за ред. В. П. Харченка. – К.: ТОВ «Абрис-принт», 2012. – 464с.
43. Харченко В. П. Основні принципи сучасної класифікації безпілотних авіаційних систем / В. П. Харченко, Д. Е. Прусов // Вісн. НАУ. – 2013. – Т. 31, № 77. – С. 73.

44. 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.
45. Целых В. Р. Многомерные адаптивные регрессионные сплайны / В. Р. Целых // Машинное обучение и анализ данных. – 2012. – Т1. № 3. – С. 272–278.
46. Шеффе Г. Дисперсионный анализ / Г. Шеффе. – М.: Физматгиз, 1963. – 471 с.
47. Ширяев А. Н. Статистический последовательный анализ. Оптимальные правила постановки / А. Н. Ширяев. – М.: Наука, 1976. – 272 с.
48. Энциклопедия безопасности авиации / [Н. С. Кулик, В. П. Харченко, М. Г. Луцкий и др.]; под ред. Н. С. Кулика. – К.: Техника, 2008. – 1000 с.
49. Эфрон Б. Нетрадиционные метода многомерного статистического анализа / Б. Эфрон. – Москва, "Финансы и статистика", 1988. – 263 с.
50. Яковлева А. В. Эконометрика / А. В. Яковлева. – М.: ЭКСМО, 2008. – 244 с.
51. Air Force Pamphlet 90-902. Operational Risk Management (ORM) Guidelines and Tools. – US Air Force. – 14 December 2000. – 105 p.
52. Ambrosius F. Interpolation of 3D surfaces for contact modeling / F. Ambrosius. – University of Twente : EEMCS, 2005. – 51 p.
53. Austin R. Unmanned aircraft systems. UAVs design, development and deployment / R. Austin. – John Wiley & Sons. – 2010. – 372 p.
54. Barnhart R. Introduction to unmanned aircraft systems / R. Barnhart, S. Hottman, D. Marshall, E. Shappee. – CRC Press, NW, 2012. – 214 p.
55. Bennett M. Development of Technologies for Low-cost Oceanographic Unmanned Aeronautical Vehicles / M. Bennett. – University of Southampton, USA, 2009. – 218 p.
56. Blom J. Unmanned aerial systems: A historical perspective / J. Blom – combat studies institute press. US Army combined arms center, Fort Leavenworth, Kansas, 2010. – 153 p.

57. Carlin B.P. Bayes and Empirical Bayes Methods for Data Analysis/ Bradley P. Carlin, Thomas A. Louis. – CRC Press, 2000. – 419 p.
58. Dalamagkidis K. On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System. Issues, Challenges, Operational Restrictions, Certification, and Recommendations / K. Dalamagkidis, P. Valavanis, L. Piegler. – Springer, 2012. – 317 p.
59. Doc 9859. Safety Management Manual (SMM). – ICAO, 2013. – 251 p.
60. Federal Aviation Administration AC 23.1309-1E. System safety analysis and assessment for part 23 airlines / U.S. Department of Transportation. – 2011. – 56 p.
61. Friedman J. Multivariate adaptive regression splines. – The Annals of Statistics, 1990. – Vol. 19. – № 1. – pp. 1–141.
62. Grewall M. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration / M. Grewall, L. Weill, A. Andrews. – A John Wiley & Sons, Inc. Publ., New York, Chichester, Brisbane, Singapore, Toronto, 2001. – 392 p.
63. Gupta S. Review of Unmanned Aircraft System (UAS) / S. Gupta, M. Ghonge, P. Jawandhiya // International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET), 2013. – Vol. 2. – № 4. – pp. 1646 – 1658.
64. Hayhurst K. Preliminary considerations for classifying hazards of unmanned aircraft systems / K. Hayhurst, J. Maddalon, P. Miner, G. Szatkowski, M. Ulrey, M. Dewalt, C. Spitzer // Tech. Rep. NASA TM-2007-214539, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, Hampton, Virginia. – 2007. – 78 p.
65. Hayhurst, K. Unmanned aircraft hazards and their implications for regulation / K. Hayhurst, J. Maddalon, P. Miner, M. Dewalt, G. McCormick // In: Proc. 25th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference, Portland, OR, USA, 2006. – pp. 1–12.

66. STANAG 4671. Unmanned Aerial Vehicle Systems Airworthiness Requirements (USAR), Joint Capability Group on Unmanned Aerial Vehicles (Draft), NATO Naval Armaments Group. – 2007. – 205 p.
67. 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.
68. 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.
69. 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.
70. Kharchenko V. Unmanned aerial vehicle collision avoidance using digital elevation model / V. Kharchenko, N. Kuzmenko // Proceeding of the NAU. – 2013. – № 1. – pp. 18–21.
71. Kharchenko V. Unmanned aerial vehicle flight data processing by spline approach / V. Kharchenko, N. Kuzmenko // Proceeding of the NAU. – 2015. – №1. – pp. 21–25.
72. Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots / O. Khatib // IEEE International Conference Robotics and Automation, 1985. – pp. 500–505.
73. Krozel J. Free Flight research issues and literature search / J. Krozel. – Los Gatos, CA: Seagull Technology, 2000. – 96 p.
74. 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.
75. 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 2011р. – Київ: НАУ, 2011. – С. 36.
76. Kuz'menko N. Equipment for satellite communication/ N. Kuz'menko // Матеріали X міжнар. наукової конф. студентів та молодих учених “Політ–2010”. – Київ, 7-9 квітня 2010 р. – К.: НАУ, 2010. – С. 44.
77. 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 – Київ: НАУ, 2010. – С. 33.
78. 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.
79. 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.
80. 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.
81. 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.
82. 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.
83. 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 2012 р. – К.: НАУ, 2012. – С. 4.
84. Kuzmenko N. UAV flight data decoding, processing and visualization tool // Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів «Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики», 23-24 жовтня – К., 2013. – С.18.
85. 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.
86. Laub A. Matrix Analysis for Scientists and Engineers. – SIAM, 2005. – 172 p.
87. Milton A. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables / A. Milton, I. Stegun. – USA department of commerce, National bureau of standards, 1972. – 470 p.
88. Morris J. Standards Committee Releases UAV Sense-and-Avoid Standard / J. Morris // Aerospace Daily and Defense Report. – 2004. – Vol. 211, №. 3. – 3 p.
89. 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.
90. 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.
91. Newcome L. Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles / L. Newcome // American Institute of Aeronautics and Astronautics. – Reston, VA, 2004. – 324 p.
92. 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.
93. 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.
94. Ostroumov I. Application for aircraft tracking / I. Ostroumov, N. Kuz'menko // *Proceeding of the NAU*. – 2011. – № 3. – pp. 43–48.
95. Range safety criteria for unmanned air vehicles – rationale and methodology supplement. Supplement to document 323-99 / Range Safety Group, Range Commanders Council. – 1999. –75 p.
96. Roadmap for the integration of civil Remotely-Piloted Aircraft Systems into the European Aviation System. Final report from the European RPAS Steering Group. – 2013. – 16 p.
97. SAE Aerospace recommended practice 4754. Certification considerations for highly-integrated or complex aircraft systems, 1996 – 88 p.
98. SAE Aerospace recommended practice 4761. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment, 1996 – 331 p.
99. Safety management manual. Doc 9858. – ICAO, 2009. – 318 p.
100. Siouris G. M. Aerospace Avionics Systems: a modern synthesis / G. M. Siouris. – Academic Press, Inc., 2007. – 466 p.
101. The UK approach to unmanned aircraft systems / Joint Doctrine Note 2/11 (JDN 2/11), 2011. – 102 p.
102. Trion R. Cluster analysis / Ann Arbor Edwards Bros, London, 1939. – 139 p.
103. Unmanned Aircraft System. Service Demand 2015 – 2035 / Technical Report, Version 0.1 — September 2013, DOT-VNTSC-DoD-13-01. U.S. Department of Transport. – 2013. – 151 p.
104. Cir 328 AN/190. Unmanned Aircraft Systems (UAS). – ICAO, 2011. – 54 p.
105. Unmanned systems integrated roadmap 2007-2032/ Report of US Department of Defense. Office of the Secretary of Defense . – 2007. – 188 p.

Додаток А.

Розроблені комп'ютерні програми

А.1. Програмне забезпечення для верифікації розроблених методів шляхом комп'ютерного моделювання у програмному середовищі MATLAB

```

tf=1;
ftime=200
time=1:tf:ftime;
ttime=time
v=5; %m/s
h=-31%m
xpl=103
ypl=103
zpl=h
headin=10
heading=10
tang=0
lat=50.274745000000000
lon=30.539358333333332
height=92
er=1
otkaz=10
star=50;
wgs84 = referenceEllipsoid('wgs84');
for i=1:length(time)
    if i>1
        xpl(i)=xpl(i-1)+v*cosd(headin)*cosd(tang);
        ypl(i)=ypl(i-1)+v*sind(headin)*cosd(tang);
        zpl(i)=zpl(i-1)+v*sind(tang);
    end
    [X(i),Y(i),Z(i)] = ned2ecef(xpl(i),ypl(i),zpl(i),deg2rad(lat),deg2rad(lon),height,wgs84);
    lla = ecef2lla([X(i),Y(i),Z(i)]);
    Lat(i)=rad2deg(lla(1));
    Lon(i)=rad2deg(lla(2));
    Alt(i)=lla(3);
    if i>120 & i<130
        heading=heading+1.6
        tang=tang+0.2
    elseif i>130 & i<144
        heading=heading-1
        tang=tang-0.1
    end
    if i==1
        xe=xpl
        ye=ypl
        ze=zpl
        he=heading
        te=tang
    elseif i>1
        xe(i)=xe(i-1)+v*cosd(heading)*cosd(tang);
        ye(i)=ye(i-1)+v*sind(heading)*cosd(tang);
        ze(i)=ze(i-1)+v*sind(tang);
        he(i)=heading
        te(i)=tang
    end
    [Xe(i),Ye(i),Ze(i)] = ned2ecef(xe(i),ye(i),ze(i),deg2rad(lat),deg2rad(lon),height,wgs84);
    llae = ecef2lla([Xe(i),Ye(i),Ze(i)]);
    Late(i)=rad2deg(llae(1));

```

```

Lone(i)=rad2deg(llae(2));
Alte(i)=llae(3);
if time(i)>star && time(i)<star+otkaz
    hs(i)=1
else
    hs(i)=0
end
end
xee=xe
yee=ye
zee=ze
xe=xe+normrnd(0,er,1,length(time))
ye=ye+normrnd(0,er,1,length(time))
ze=ze+normrnd(0,er,1,length(time))
he=he+normrnd(0,0.5,1,length(time))
te=te+normrnd(0,0.5,1,length(time))
i_var1=xpl
i_var2=ypl
i_var3=zpl
var1=xe(time)';
var2=ye(time)';
var3=ze(time)';
varr1=xe(time)';
varr2=ye(time)';
varr3=ze(time)';
figure(10);
subplot(4,1,1);
plot(time,i_var1,'k-', time,xee(time),'k--',time, var1, 'k*');
xlabel('time')
ylabel('X')
legend('Польотне завдання', 'Траекторія польоту', 'Результати вимірювань')
hold on
plot(star*ones(2),[min(var1),max(var1)],'k-',(star+otkaz)*ones(2),[min(var1),max(var1)],'k-')
ylim([min(var1),max(var1)])
box off
grid on
subplot(4,1,2);
plot(time,i_var2,'k-', time,yee(time),'k--',time, var2, 'k*');
xlabel('time')
ylabel('Y')
legend('Польотне завдання', 'Траекторія польоту', 'Результати вимірювань')
hold on
plot(star*ones(2),[min(var2),max(var2)],'k-',(star+otkaz)*ones(2),[min(var2),max(var2)],'k-')
ylim([min(var2),max(var2)])
box off
grid on
subplot(4,1,3);
plot(time,i_var3,'k-', time,zee(time),'k--',time, var3, 'k*');
xlabel('time')
ylabel('Z')
legend('Польотне завдання', 'Траекторія польоту', 'Результати вимірювань')
hold on
plot(star*ones(2),[min(var3),max(var3)],'k-',(star+otkaz)*ones(2),[min(var3),max(var3)],'k-')
ylim([min(var3),max(var3)])
grid on
subplot(4,1,4);
stairs(time, hs,'k')
ylim([0,2])
box off
grid on
figure(12);
plot(time,he(time),'k-', time,te(time),'k--');
xlabel('time')

```

```

legend('Курь', 'Тангаж')
grid on
box off
time(star:tf:star+otkaz)=[]
var1(star:tf:star+otkaz)=[]
var2(star:tf:star+otkaz)=[]
var3(star:tf:star+otkaz)=[]
y=[var1'; var2'; var3'];
y1=[varr1'; varr2'; varr3'];
%S=eye(3);
S=[er 0 0;0 er 0;0 0 er];
% spline step
h=10
% B-spline
b=B2(time,h, min(time),max(time)); %22*179
%c=ones(32,32)
sigma=er;
s=[er 0 0; 0 er 0;0 0 er]
ss=zeros(size(b,1)*size(y,1),1);
sd=zeros(size(b,1)*size(y,1),size(b,1)*size(y,1));
H1=sd;
s_n=zeros(size(b,1),size(b,1));
s_m=zeros(size(b,1),size(y,1));
for i=1:length(time)
    g=b(:,i)*y(:,i)'*inv(s)
    ss=ss+reshape(g,[],1);
    sd=sd+kron(inv(s),b(:,i)*b(:,i)');
    % sd=sd+kron(inv(s),c);
    s_n=s_n+((b(:,i)*b(:,i)')/(sigma.^2));
    s_m=s_m+((b(:,i)*y(:,i)')/(sigma.^2));
    %H calc
    H1=H1+kron(b(:,i),inv(s))*s*(kron(b(:,i),inv(s))); %66*66
    clear g
end
X=inv(sd)*ss;
XX=inv(s_n)*s_m;
% By KRoneker
XXX(:,1)=X(1:size(X,1)/size(y,1),1);
XXX(:,2)=X(size(X,1)/size(y,1)+1:2*(size(X,1)/size(y,1)),1);
XXX(:,3)=X(2*(size(X,1)/size(y,1))+1:size(X,1),1);
ysx=XXX(:,1)*b;
yqx=XXX(:,2)*b;
ytx=XXX(:,3)*b;
ys=XX(:,1)*b;
yq=XX(:,2)*b;
yu=XX(:,3)*b;
time_p=star:tf:star+otkaz
Y1=XXX(:,1)*B2(time_p,h, min(time),max(time));
Y2=XXX(:,2)*B2(time_p,h, min(time),max(time));
Y3=XXX(:,3)*B2(time_p,h, min(time),max(time));
err1=abs(Y1-varr1(time_p))
err2=abs(Y2-varr2(time_p))
err3=abs(Y3-varr3(time_p))
dtr=10
figure(4);
grid on
subplot(3,1,1);
plot(time((star-dtr):star-1),xe((star-dtr):star-1),'k*-');
ttime((star+otkaz+1):(star+otkaz+dtr)),xe((star+otkaz+1):(star+otkaz+dtr)),'k*-');
hold on
ylim([min(xe((star-dtr):(star+otkaz+dtr))),max(xe((star-dtr):(star+otkaz+dtr)))] )
plot(time_p,Y1,'ko-');
hold on

```

```

plot(star*ones(2),[min(xe((star-dtr):(star+otkaz+dtr))), max(xe((star-dtr):(star+otkaz+dtr))), 'k-
',(star+otkaz)*ones(2),[min(xe((star-dtr):(star+otkaz+dtr))), max(xe((star-dtr):(star+otkaz+dtr))), 'k-')
hold on
plot(ttime((star-dtr):(star+otkaz+dtr)),xpl((star-dtr):(star+otkaz+dtr)), 'k--');
xlabel('Time,s')
ylabel('X,m')
grid on
subplot(3,1,2);
plot(ttime((star-dtr):star-1),ye((star-dtr):star-1), 'k*-',
ttime((star+otkaz+1):(star+otkaz+dtr)),ye((star+otkaz+1):(star+otkaz+dtr)), 'k*-');
hold on
ylim([min(ye((star-dtr):(star+otkaz+dtr))),max(ye((star-dtr):(star+otkaz+dtr))) ])
plot(time_p,Y2,'ko-');
hold on
plot(star*ones(2),[min(ye((star-dtr):(star+otkaz+dtr))), max(ye((star-dtr):(star+otkaz+dtr))), 'k-
',(star+otkaz)*ones(2),[min(ye((star-dtr):(star+otkaz+dtr))), max(ye((star-dtr):(star+otkaz+dtr))), 'k-')
hold on
plot(ttime((star-dtr):(star+otkaz+dtr)),ypl((star-dtr):(star+otkaz+dtr)), 'k--');
xlabel('Time,s')
ylabel('Y,m')
grid on
subplot(3,1,3);
plot(ttime((star-dtr):star-1),ze((star-dtr):star-1), 'k*-',
ttime((star+otkaz+1):(star+otkaz+dtr)),ze((star+otkaz+1):(star+otkaz+dtr)), 'k*-');
hold on
ylim([min([ze((star-dtr):(star+otkaz+dtr)), Y3]),max([ze((star-dtr):(star+otkaz+dtr)), Y3]) ])
plot(time_p,Y3,'ko-');
hold on
plot(star*ones(2),[min(ze((star-dtr):(star+otkaz+dtr))), max(ze((star-dtr):(star+otkaz+dtr))), 'k-
',(star+otkaz)*ones(2),[min(ze((star-dtr):(star+otkaz+dtr))), max(ze((star-dtr):(star+otkaz+dtr))), 'k-')
hold on
plot(ttime((star-dtr):(star+otkaz+dtr)),zpl((star-dtr):(star+otkaz+dtr)), 'k--');
xlabel('Time,s')
ylabel('Z,m')
grid on
figure(5)
plot(star:tf.star+otkaz,err1,'-k',star:tf.star+otkaz,err2,'-k',star:tf.star+otkaz,err3,'-k')
xlabel('Time,s')
ylabel('Error,m')
legend('за координатою X','за координатою Y','за координатою Z')
box off
grid on
%Data from system
Var1(time)=var1
Var1(time_p)=Y1
Var2(time)=var2
Var2(time_p)=Y2
Var3(time)=var3
Var3(time_p)=Y3
deviation=sqrt((Var1-i_var1).^2+(Var2-i_var2).^2+(Var3-i_var3).^2)
figure(8)
plot(ttime, deviation, 'k')
title('deviation');
box off
grid on
%Flight state limits calculation
m=0;
max_dev=30;
pk=0.5*10^(-6);
pyy=0.5*10^(-3);
pc=0.5*10^(-4);
pa=0.5*10^(-5);
a=norminv(pk,0,1)

```

```

sig=((max_dev-m)/a)
xyy=((norminv(pyy,0,1))*sig)+m
xc=((norminv(pc,0,1))*sig)+m
xa=((norminv(pa,0,1))*sig)+m

%flight state determination
figure(9)
subplot(2,1,1)
plot(ttime, deviation,'k')
hold on
plot([min(time),max(time)],xa*ones(2),'k')
hold on
plot([min(time),max(time)],xc*ones(2),'k')
hold on
plot([min(time),max(time)],xyy*ones(2),'k')
hold on
plot([min(time),max(time)],max_dev*ones(2),'k')
text(25,15,'HC')
text(25,xyy+(xc-xyy)/2,'УУП')
text(25,xc+(xa-xc)/2,'CC')
text(25,xa+(max_dev-xa)/2,'AC')
box off
grid on
k1=find(deviation<xyy)
fs(k1)=1;
k2=find(deviation>=xyy & deviation<xc)
fs(k2)=2;
k3=find(deviation>=xc & deviation<xa)
fs(k3)=3;
k4=find(deviation>=xa & deviation<max_dev)
fs(k4)=4;
k5=find(deviation>=max_dev)
fs(k5)=5;
subplot(2,1,2)
stairs(ttime, fs,'-k')
ylim([0,5])
box off
grid on
ylabels = {'HC','УУП','CC','AC','KC'}
set(gca, 'Ytick', 1:5, 'YtickLabel', ylabels)
%probability calculation
for i=1:length(ttime)
p1(i)=normcdf(xyy,deviation(i),1)-normcdf(-xyy,deviation(i),1)
p2(i)=normcdf(xc,deviation(i),1)-normcdf(xyy,deviation(i),1)
p3(i)=normcdf(xa,deviation(i),1)-normcdf(xc,deviation(i),1)
p4(i)=normcdf(max_dev,deviation(i),1)-normcdf(xa,deviation(i),1)
p5(i)=1-normcdf(max_dev,deviation(i),1)
end
figure(11)
stairs(ttime,p1,'-k')
hold on
stairs(ttime,p2,'--k')
hold on
stairs(ttime,p3,'-k')
hold on
stairs(ttime,p4,':k')
hold on
stairs(ttime,p5,'--k')
legend('Нормальна Ситуація','Ускладнення Умов Польоту','Складна Ситуація','Аварійна
Ситуація','Катастрофічна Ситуація')
box off
grid on
mmax=max(deviation(time_p))

```

```

mmean=mean(deviation(time_p))
sstd=std(deviation(time_p))
% 1 spline interpolation
a_var1=interp1(time,var1,time_p,'spline');
a_var2=interp1(time,var2,time_p,'spline');
a_var3=interp1(time,var3,time_p,'spline');
a_err1=abs(Y1-a_var1)
a_err2=abs(Y2-a_var2)
a_err3=abs(Y3-a_var3)
a_deviation=sqrt((Var1(time_p)-a_var1).^2+(Var2(time_p)-a_var2).^2+(Var3(time_p)-a_var3).^2)
mmax(2)=max(a_deviation)
mmean(2)=mean(a_deviation)
sstd(2)=std(a_deviation)
b_var1=interp1(time,var1,time_p,'cubic');
b_var2=interp1(time,var2,time_p,'cubic');
b_var3=interp1(time,var3,time_p,'cubic');
%p=polyfit(time_p,var1,n)
%b_var1 = polyval(p,time_p)
b_err1=abs(Y1-b_var1)
b_err2=abs(Y2-b_var2)
b_err3=abs(Y3-b_var3)
b_deviation=sqrt((Var1(time_p)-b_var1).^2+(Var2(time_p)-b_var2).^2+(Var3(time_p)-b_var3).^2)
mmax(3)=max(b_deviation)
mmean(3)=mean(b_deviation)
sstd(3)=std(b_deviation)
figure(100)
plot(star:tf:star+otkaz,err1,'-k',star:tf:star+otkaz,err2,'-k',star:tf:star+otkaz,err3,'-k')
hold on
plot(time_p,a_err1,'-r',time_p,a_err2,'-r',time_p,a_err3,'-r')
box off
grid on
figure(101)
plot(time_p, deviation(time_p),'-k',time_p, a_deviation,'-k',time_p, b_deviation,'k')
legend('Багатопараметричний метод відновлення', 'Відновлення за сплайном', 'Відновлення поліномом')
box off
grid on

```

A.2. Текст комп'ютерної програми, що реалізує функцію Кокс-Де Бура

```

function b=B2(x,h, cell_min, cell_max)
global B2
% x - time line
% h - spline step
cell=cell_min*-3*h:h:cell_max+2*h;
for j=1:length(x)
    for i=3:length(cell)-2
        k=(x(j)-cell(i))/h;
        if x(j)>cell(i-2) && x(j)<=cell(i-1)
            b(i,j)=((k+2)^3)/6;
        elseif x(j)>cell(i-1) && x(j)<=cell(i)
            b(i,j)=0.6667-0.5*((k^3)+2*(k^2));
        elseif x(j)>cell(i)&& x(j)<=cell(i+1)
            b(i,j)=0.6667+0.5*((k^3)-2*(k^2));
        elseif x(j)>cell(i+1)&& x(j)<=cell(i+2)
            b(i,j)=-((2-k)^3)/6;
        else
            b(i,j)=0;
        end
    end
end
end
b(1:2,:)=[];

```

А.3. Текст комп'ютерних програм пошуку аномальних даних

```

function H=grabbs(D)
% Функція, що реалізує пошук аномальних значень у масиві даних за методою Грабса
D=D'
H=zeros(1,length(D))
D1=D
r=1
i=1
while r
    clear r
    n=length(D)
    x=sum(D)/n
    s2=sqrt((sum((D-x).^2))/(n-1))
    st=abs((D-x)/((s2)))
    if n==3
        kri=1.412;
    end
    if n==4
        kri=1.689;
    end
    if n==5
        kri=1.869;
    end
    if n==6
        kri=1.996;
    end
    if n==7
        kri=2.093;
    end
    if n==8
        kri=2.172;
    end
    if n==9
        kri=2.238;
    end
    if n==10
        kri=2.294;
    end
    if n==11
        kri=2.343;
    end
    if n==12
        kri=2.387;
    end
    if n==13
        kri=2.426;
    end
    if n==14
        kri=2.461;
    end
    if n>14 & n<=16
        kri=2.523;
    end
    if n>16 & n<=18
        kri=2.577;
    end
    if n>18 & n<=20
        kri=2.623;
    end
    if n>20 & n<=22
        kri=2.664;
    end
end

```

```

end
if n>22 & n<=24
    kri=2.701;
end
if n>24 & n<=26
    kri=2.734;
end
if n>28 & n<=30
    kri=2.792;
end
if n>30 & n<=35
    kri=2.853;
end
if n>35 & n<=40
    kri=2.904;
end
if n>40 & n<=45
    kri=2.948;
end
if n>45
    kri=2.987;
end
[c vv]=find(st>=kri)
r=c
if vv
    v=vv(1)
    Val=D(1, v)
    [c val(i,1)]=find(D1==Val)
val(i,2)=Val
H(val(i,1))=1
end
D(v)=[]
i=i+1
end
function H=romanovski(D)
% Функція, що реалізує пошук аномальних значень у масиві даних за методою Романовського
D=D'
H=zeros(1,length(D))
D1=D
r=1
i=1
while r
    clear r
    n=length(D)
    x=sum(D)/n
    s2=sqrt((sum((D-x).^2))/(n-1))
    st=abs((D-x)/((s2)))
    if n>1 & n<=4
        kri=1.71;
    end
    if n>4 & n<=6
        kri=2.1;
    end
    if n>6 & n<=8
        kri=2.27;
    end
    if n>8 & n<=10
        kri=2.41;
    end
    if n>10 & n<=12
        kri=2.52;
    end
    if n>12 & n<=15

```



```

    kri=2.64;
end
if n>15
    kri=2.78;
end
[c vv]=find(st>=kri)
r=c
if vv
    v=vv(1)
    Val=D(1, v)
    [c val(i,1)]=find(D1==Val)
val(i,2)=Val
H(val(i,1))=1
end
D(v)=[]
i=i+1
end
function H=sharlie(D)
% Функція, що реалізує пошук аномальних значень у масиві даних за методою Шарльє
D=D'
H=zeros(1,length(D))
D1=D
n=length(D)
x=sum(D)/n
s2=sqrt((sum((D-x).^2)/(n-1))
st=abs((D-x))
if n>2 & n<=5
    kri=1.5*s2;
end
if n>5 & n<=10
    kri=1.65*s2;
end
if n>10 & n<=20
    kri=1.96*s2;
end
if n>20 & n<=30
    kri=2.13*s2;
end
if n>30 & n<=40
    kri=2.24*s2;
end
if n>40 & n<=50
    kri=2.32*s2;
end
if n>50 %& n<=100
    kri=2.58*s2;
end
[c v]=find(st>kri)
if v
    H(v)=1
end

function H=shovine(D)
% Функція, що реалізує пошук аномальних значень у масиві даних за методою Шовіне
D=D'
H=zeros(1,length(D))
D1=D
r=1
i=1
while r
    clear r
    n=length(D)
    x=sum(D)/n

```

```

s2=sqrt((sum((D-x).^2))/(n-1))
st=abs((D-x))
if n>2 & n<=3
    kri=1.6*s2;
end
if n>3 & n<=6
    kri=1.7*s2;
end

if n>6 & n<=8
    kri=1.9*s2;
end
if n>8 & n<=10
    kri=2*s2;
end
end
[c v]=find(st>kri)
r=c
if v
    Val=D(1, v)
    [c val(i,1)]=find(D1==Val)
val(i,2)=Val
H(val(i,1))=1
end
D(v)=[]
i=i+1
end
function H=sigma3(D)
% Функція, що реалізує пошук аномальних значень у масиві даних за методою Трьох Сигм
D=D'
H=zeros(1,length(D))
D1=D
r=1
i=1
while r
    clear r
    n=length(D)
    %x=sum(D)/n
    x=mean(D)
    %s2=sqrt((sum((D-x).^2))/(n))
    s2=sqrt(std(D))
    st=abs((D-x))
    [c vv]=find(st>3*s2)
    r=c
    if vv
        v=vv(1)
        Val=D(1, v)
        [c val(i,1)]=find(D1==Val)
        val(i,2)=Val
        H(val(i,1))=1
    end
    D(v)=[]
    i=i+1
end
end

```

Додаток Б.
**Візуалізація польотної інформації за розробленим програмно-
алгоритмічним забезпеченням**

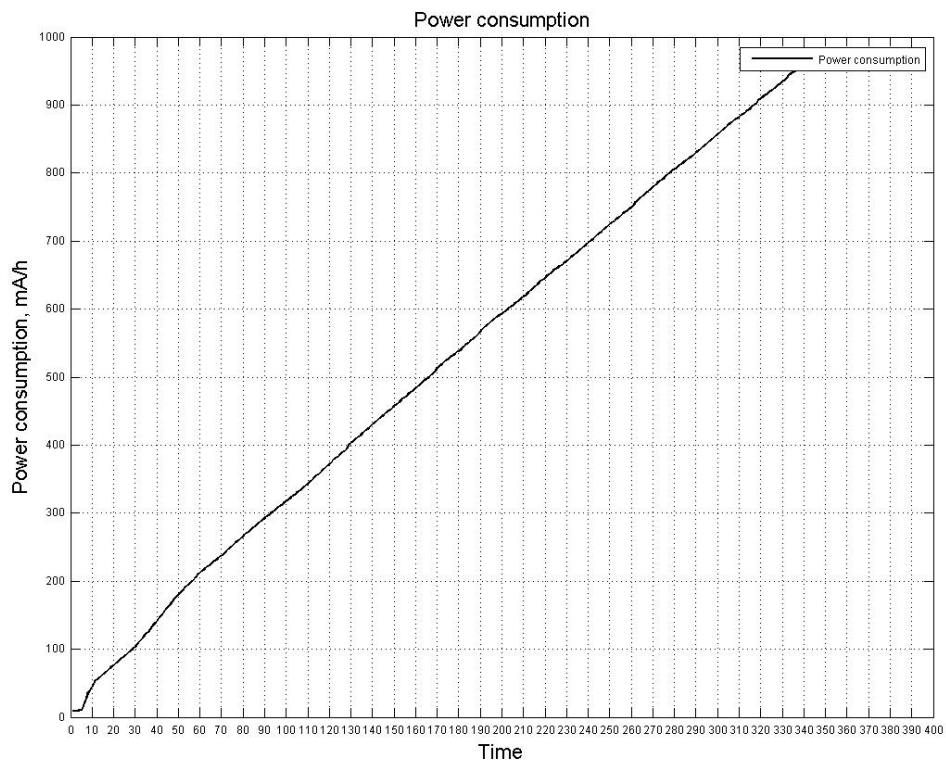


Рис. Б.1. Залежність енергоспоживання від часу

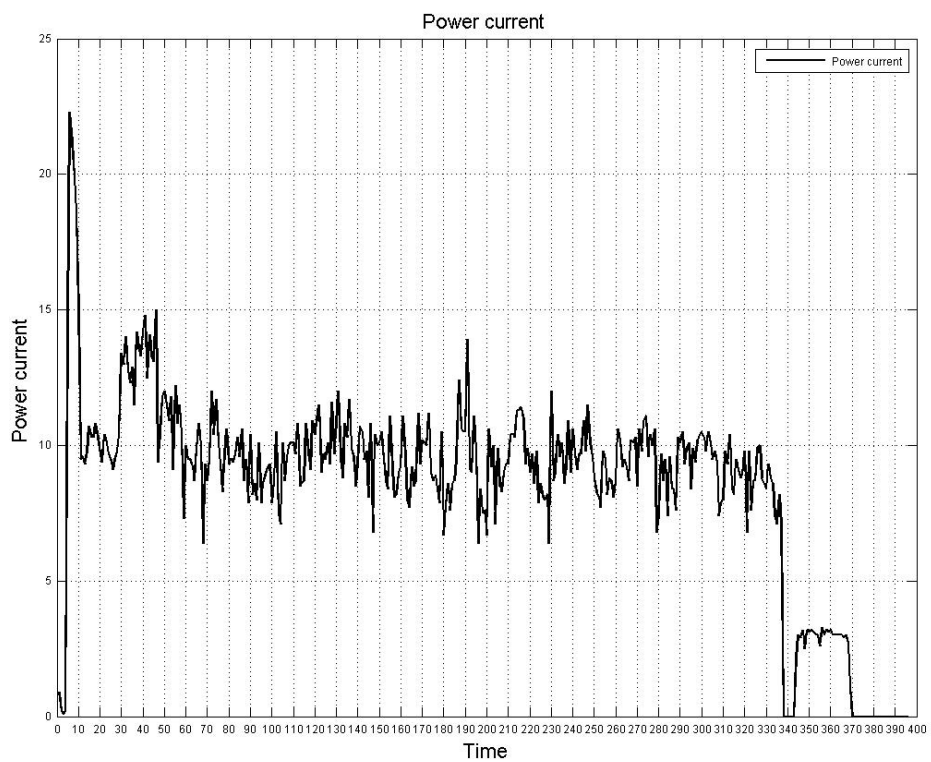


Рис. Б.2. Залежність струму від часу

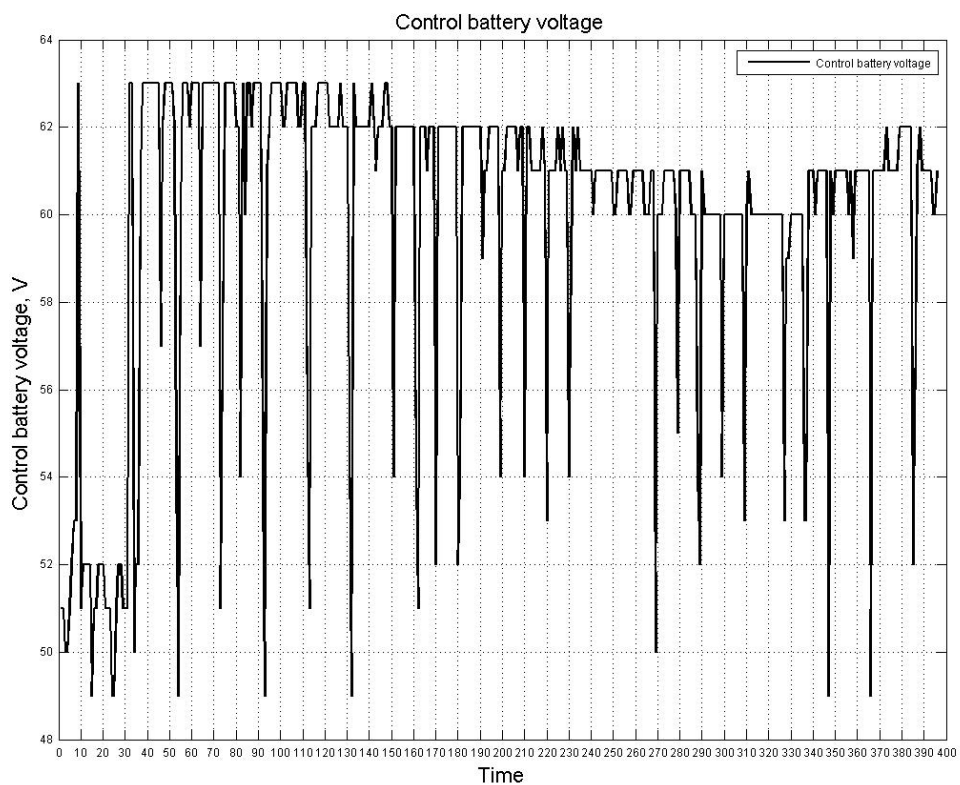


Рис. Б.3. Залежність напруги живлення від часу

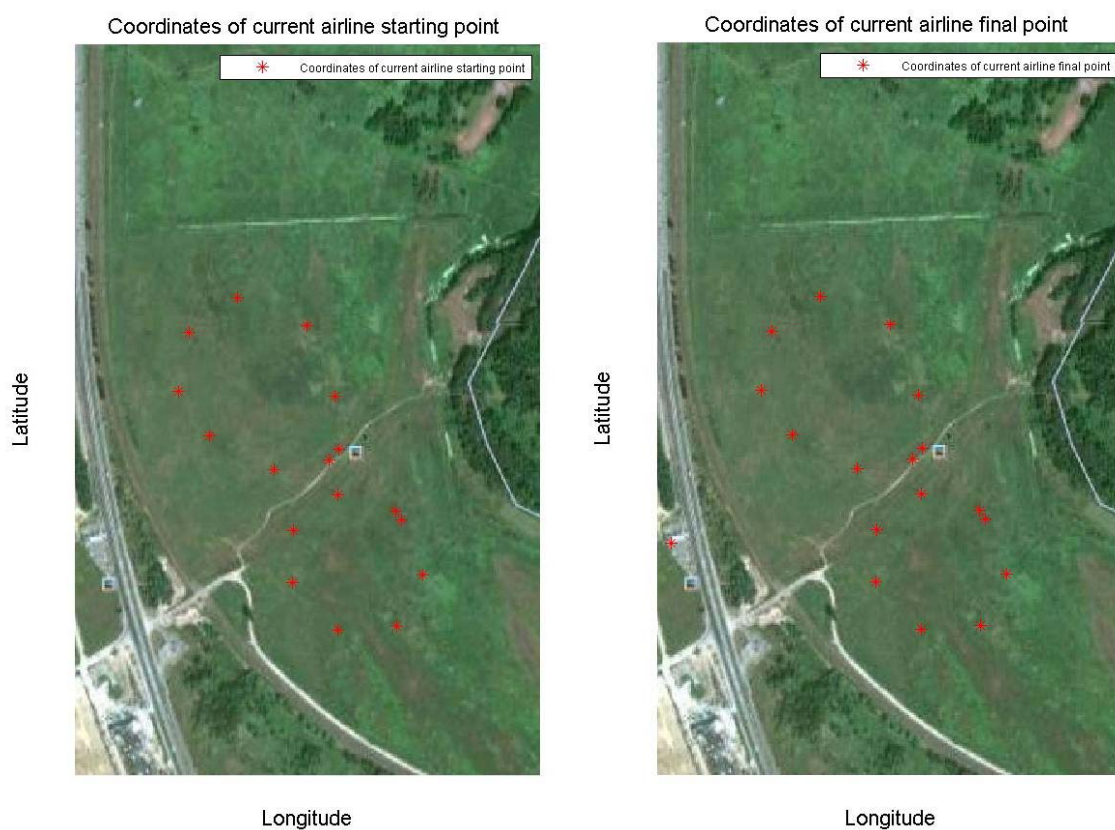


Рис. Б.4. Координати початкової та кінцевої точок прольоту

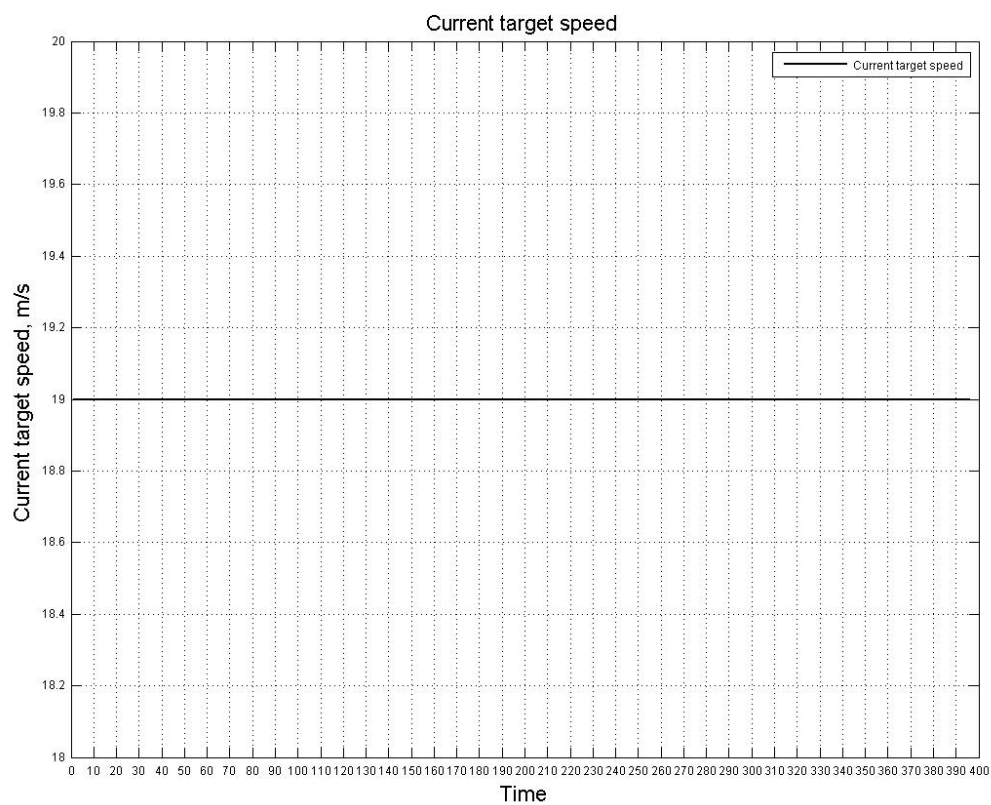


Рис. Б.5. Швидкість руху

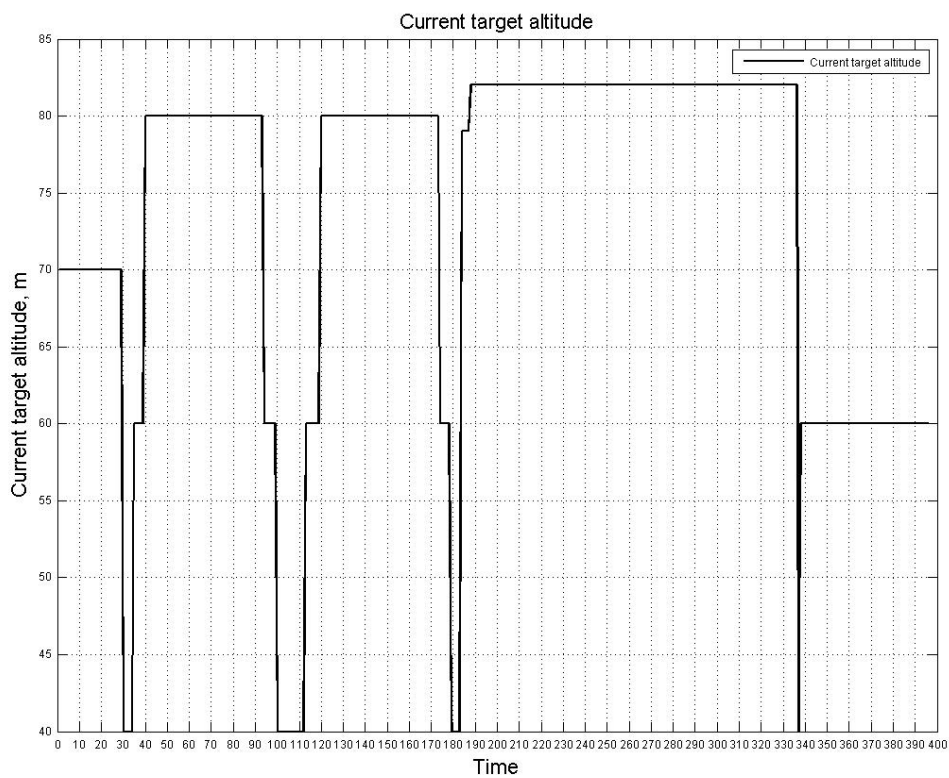


Рис. Б.6. Висота польоту

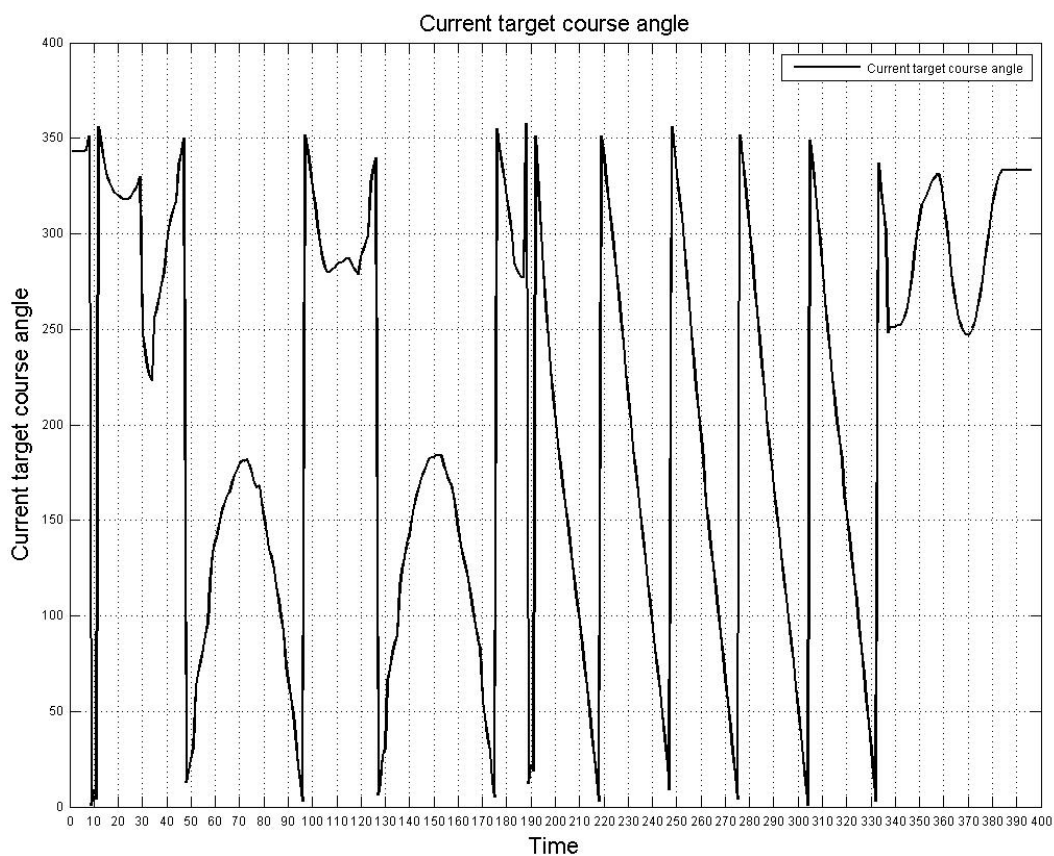


Рис. Б.7. Курс

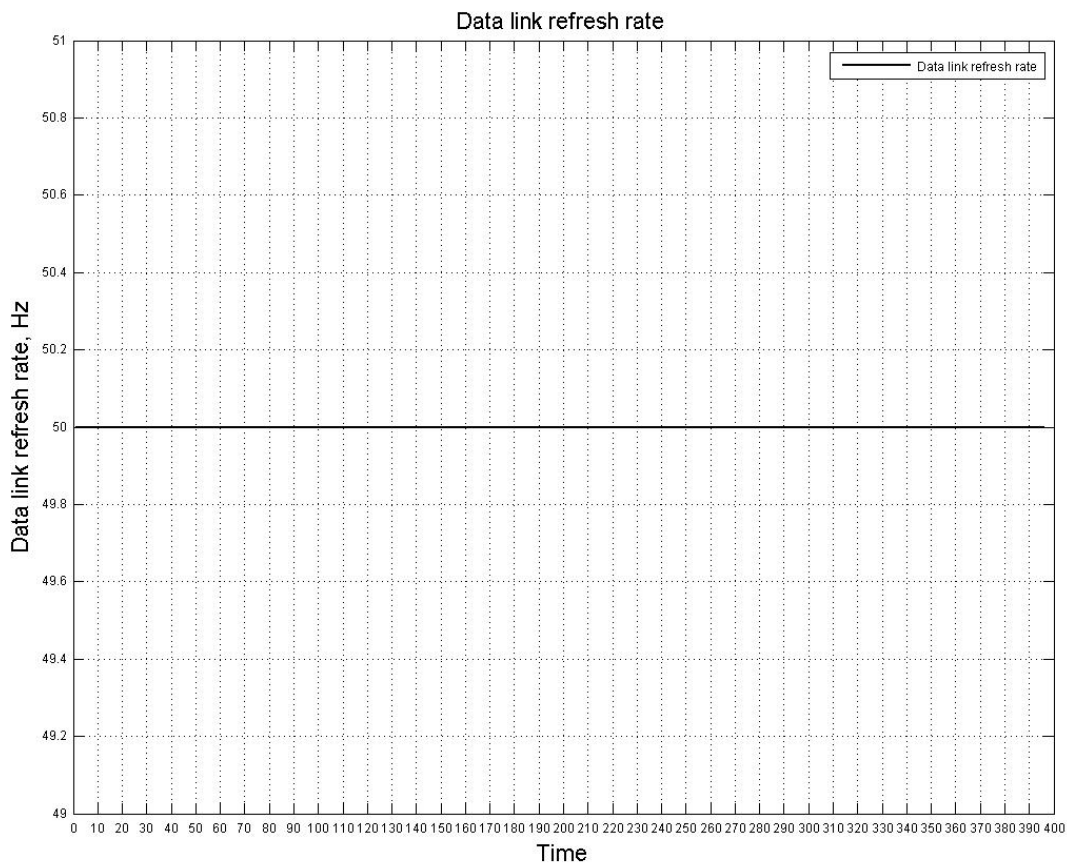


Рис. Б.8. Частота передачі даних

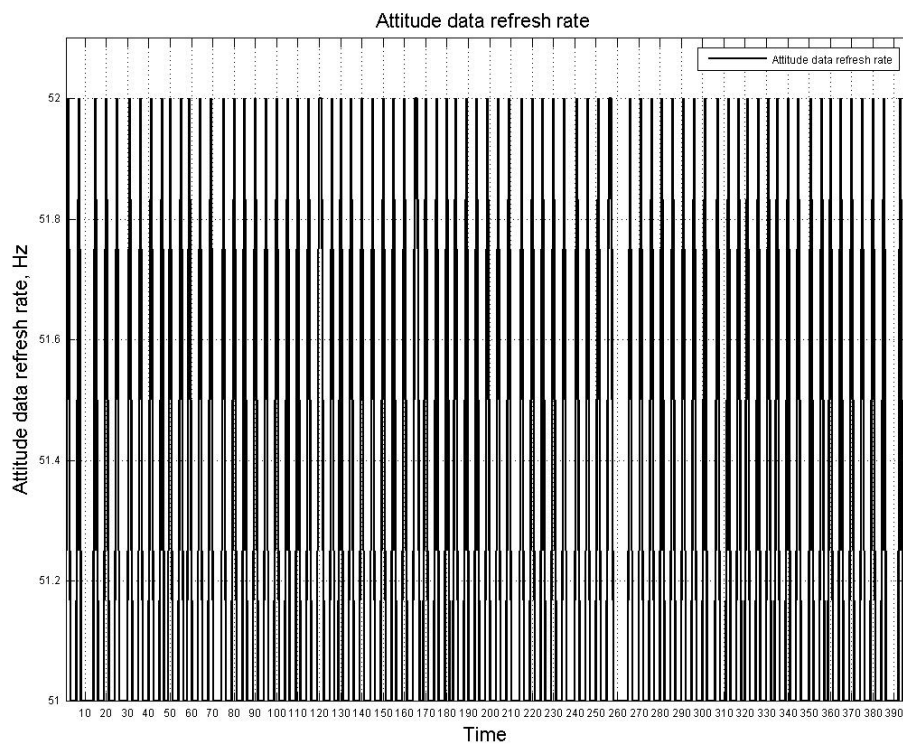


Рис. Б.9. Частота оновлення даних

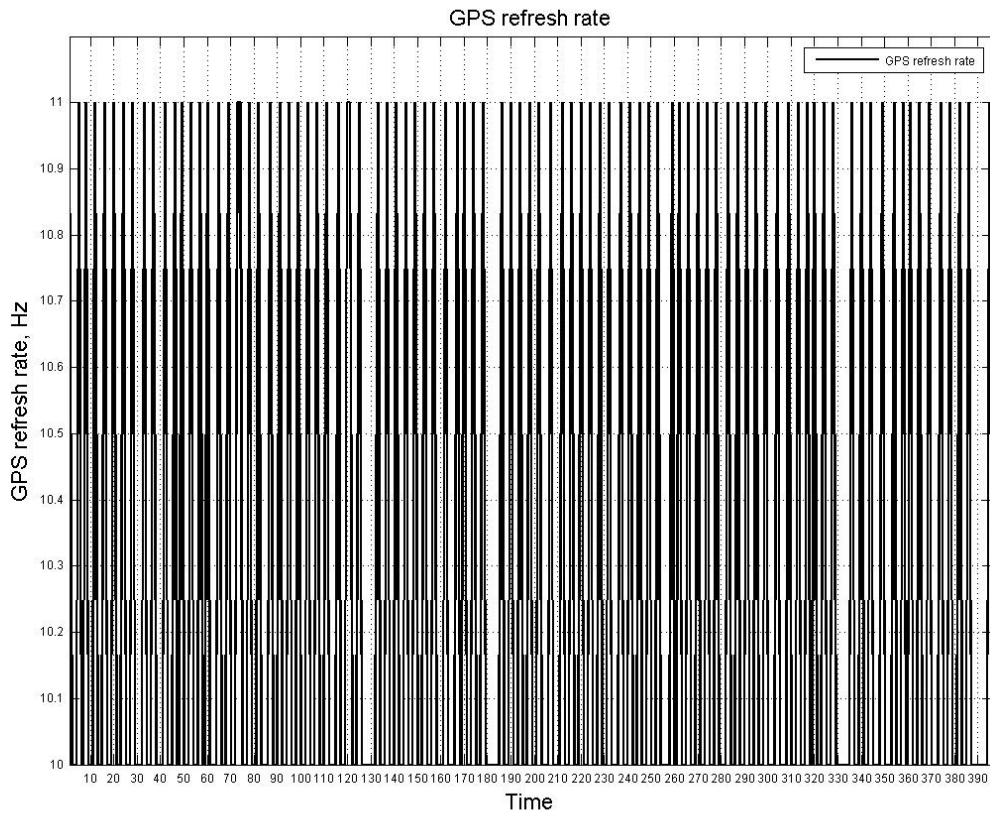


Рис. Б.10. Частота оновлення даних місцеположення

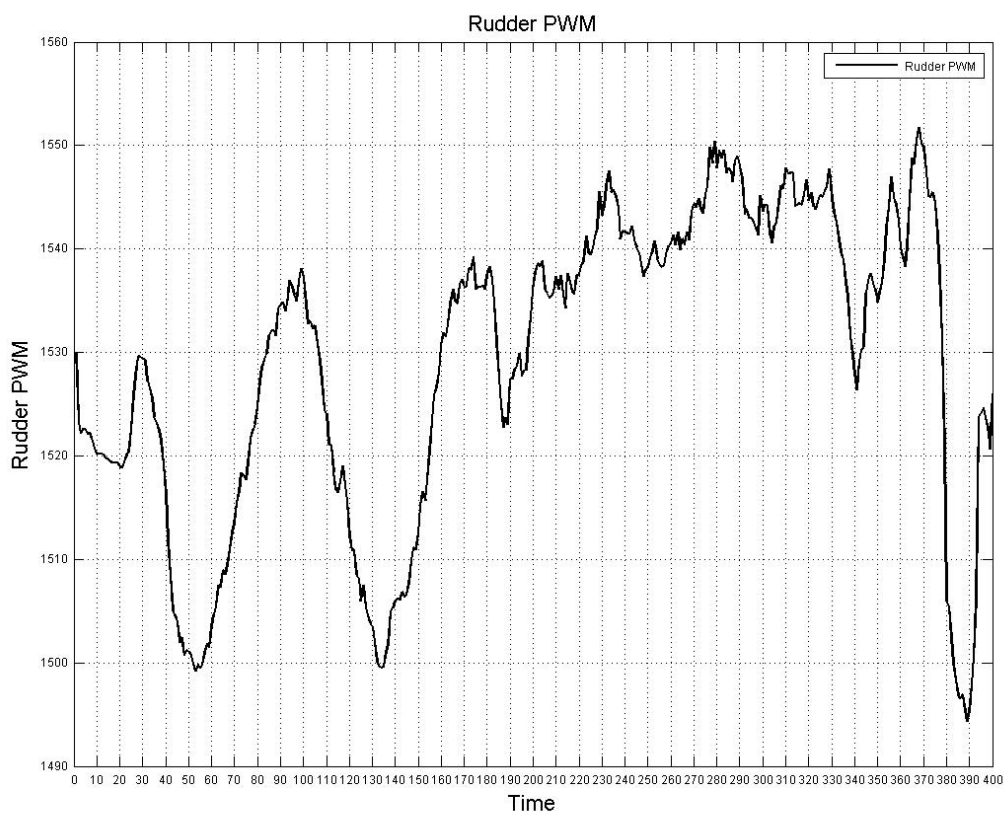


Рис. Б.11. Широкоімпульсна модуляція руля керування

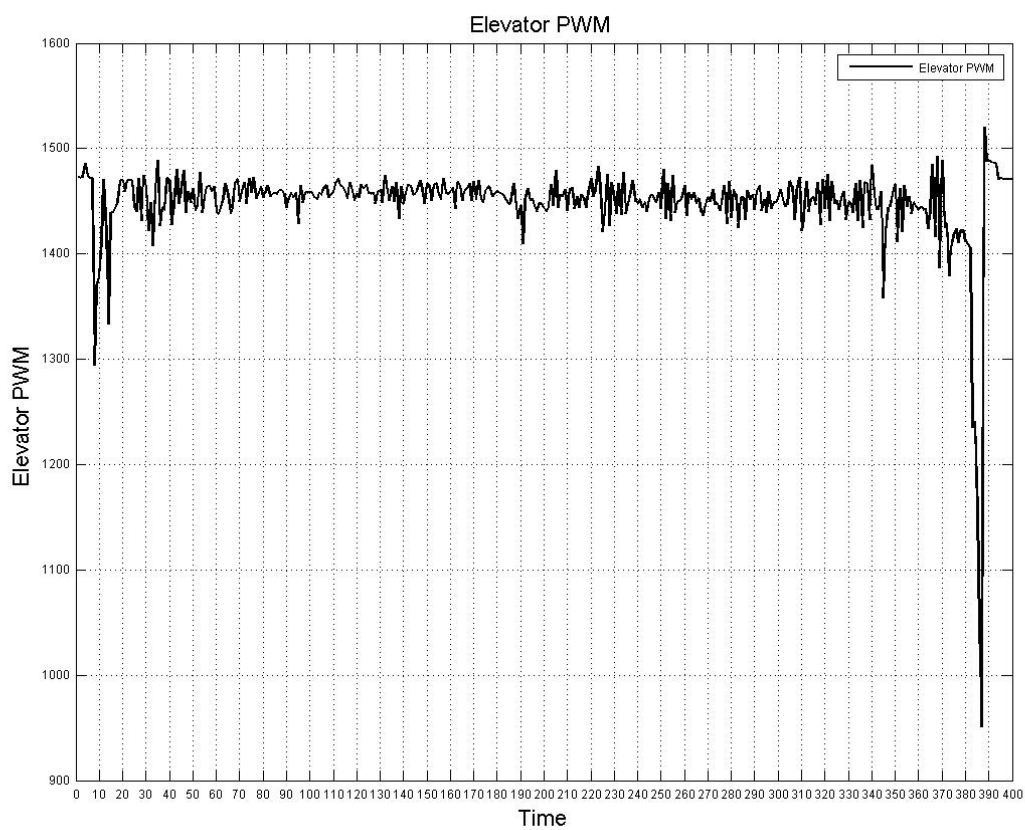


Рис. Б.12. Широкоімпульсна модуляція руля висоти

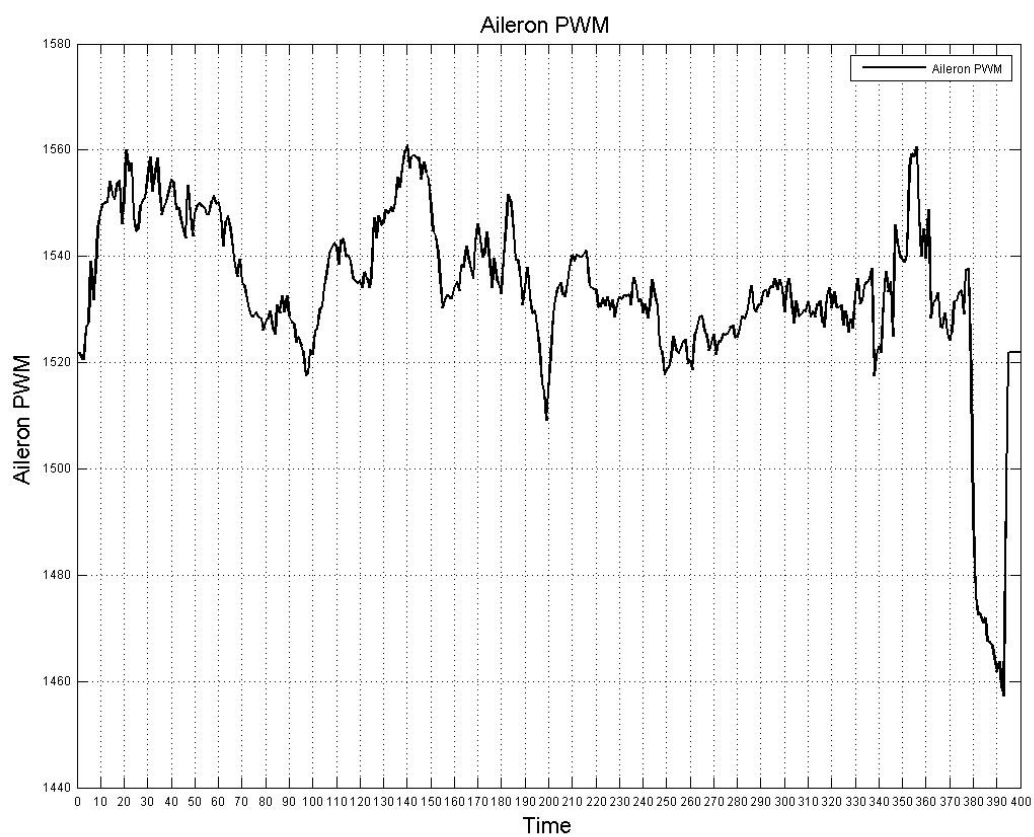


Рис. Б.13. Широкоімпульсна модуляція елеронів

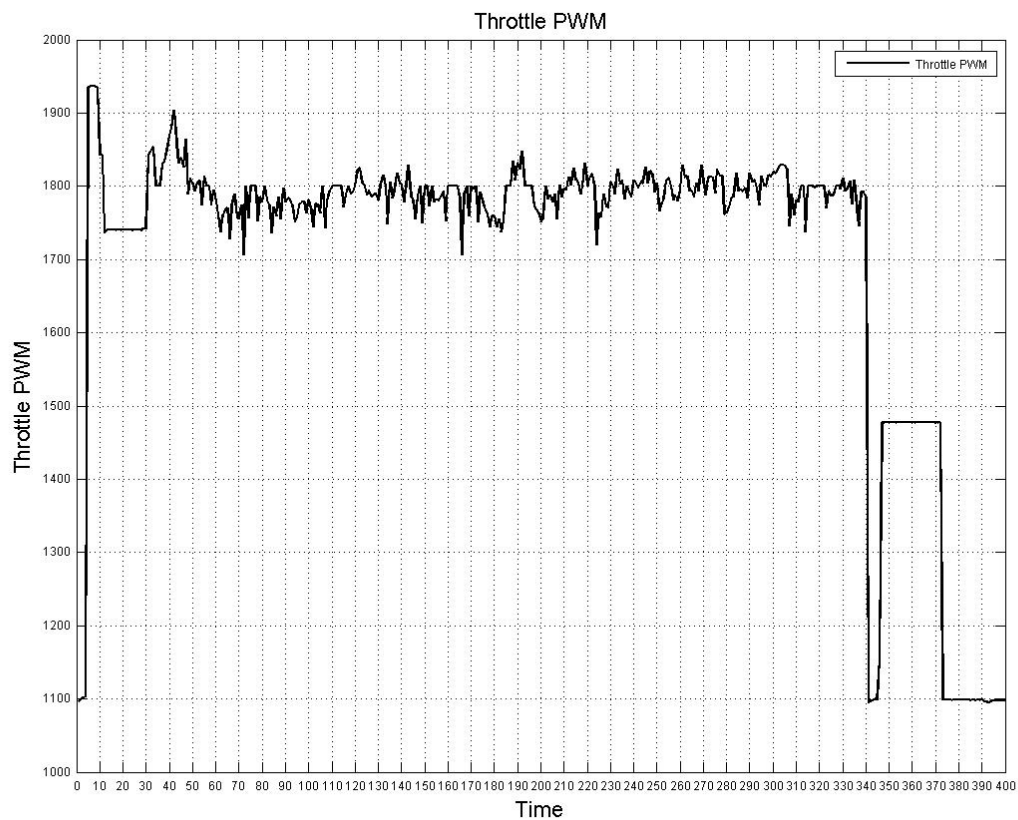


Рис. Б.14. Широкоімпульсна модуляція тяги двигуна

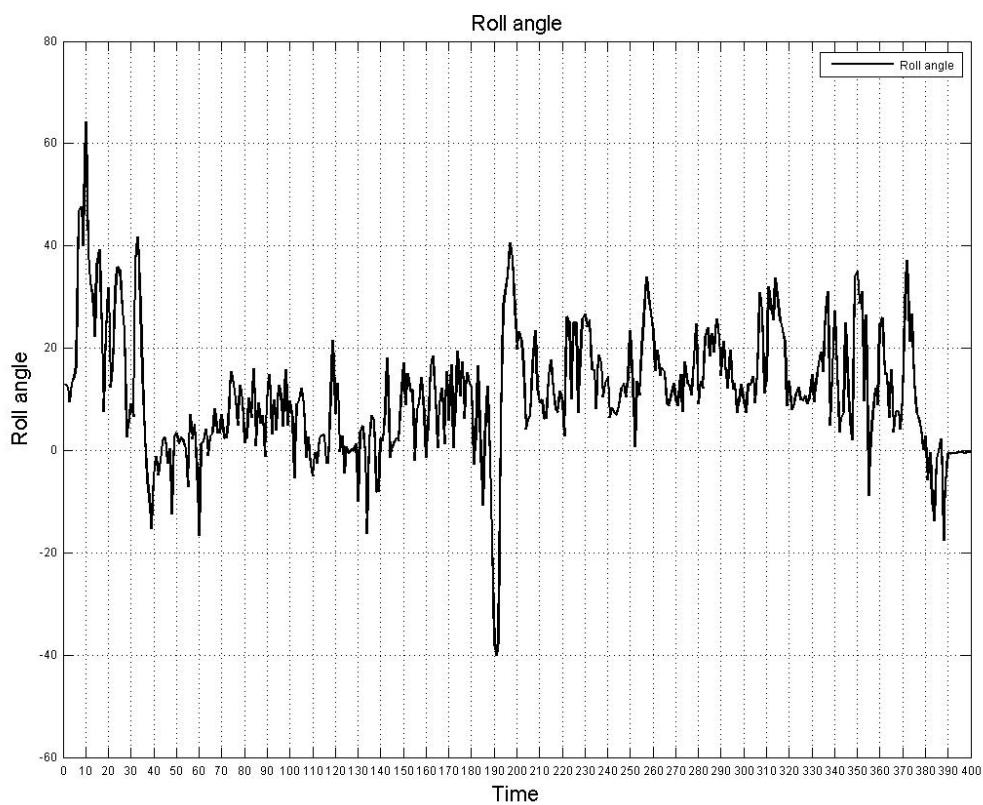


Рис. Б.15. Кут крену

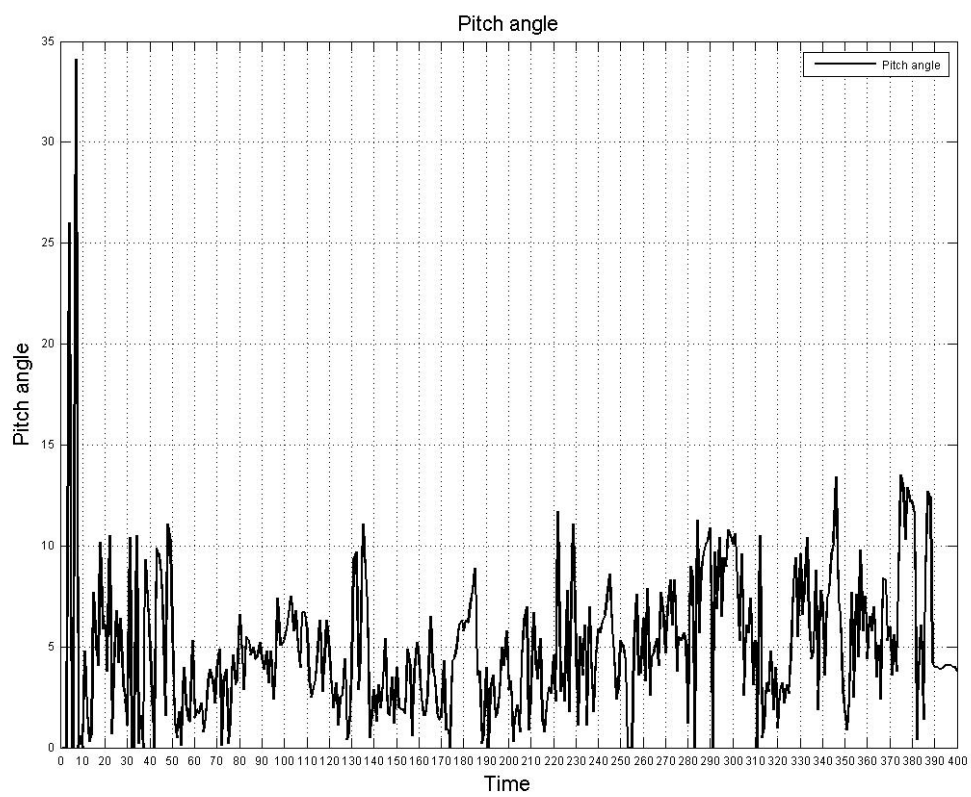


Рис. Б.16. Кут тангажу

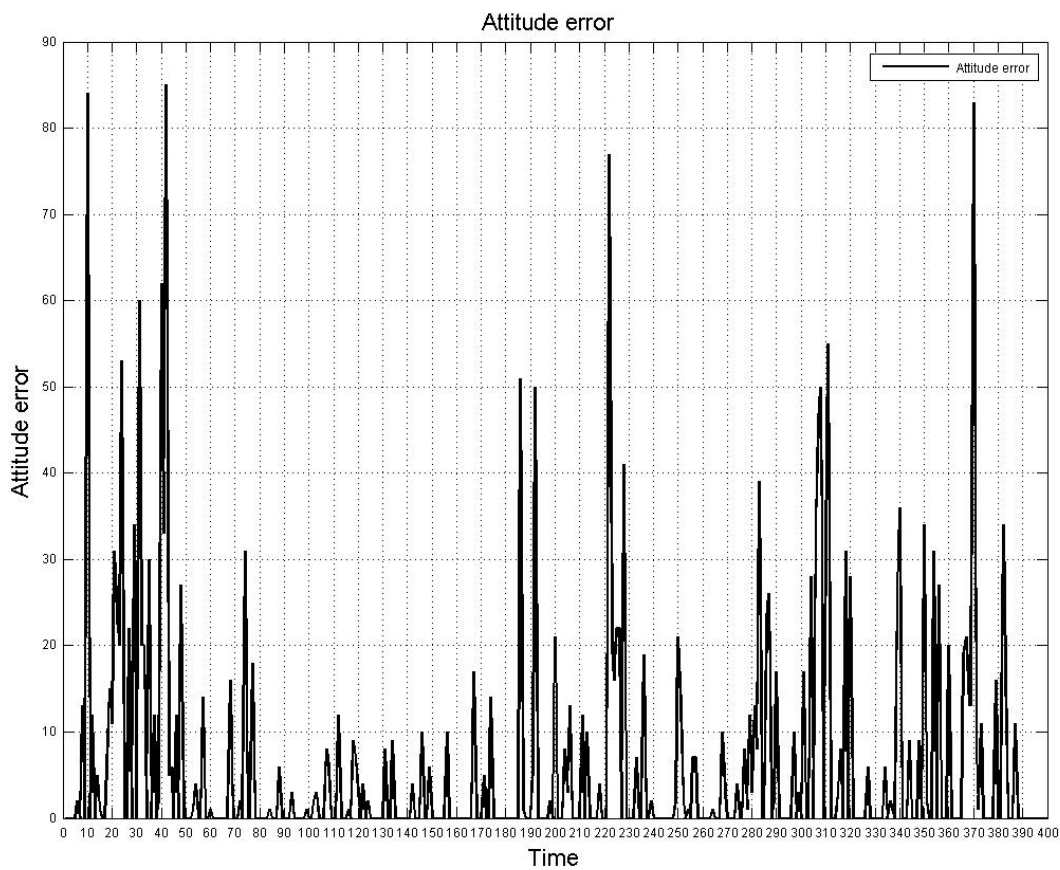


Рис. Б.17. Похибка визначення місцеположення

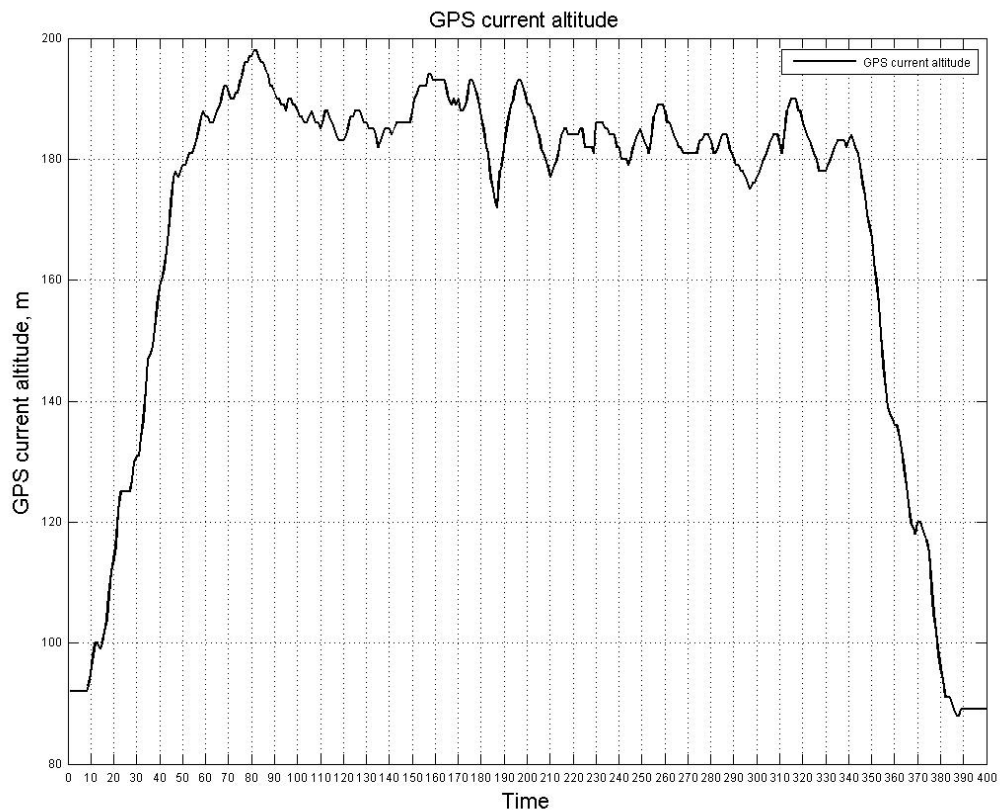


Рис. Б.18. Висота за GPS

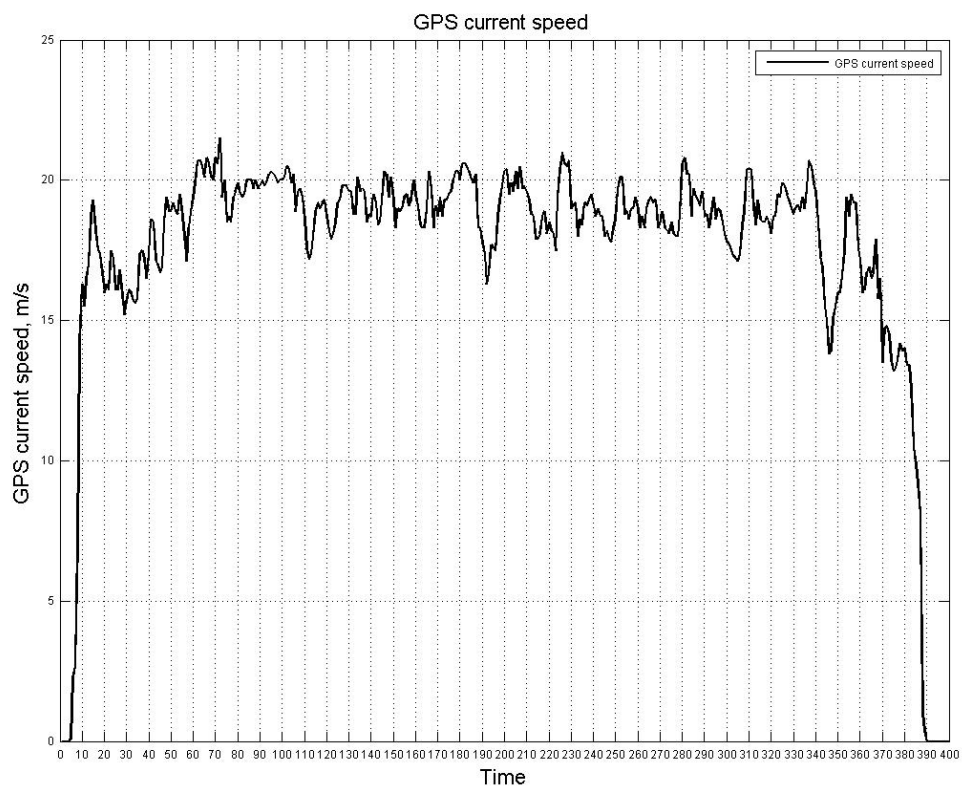


Рис. Б.19. Шляхова швидкість за GPS

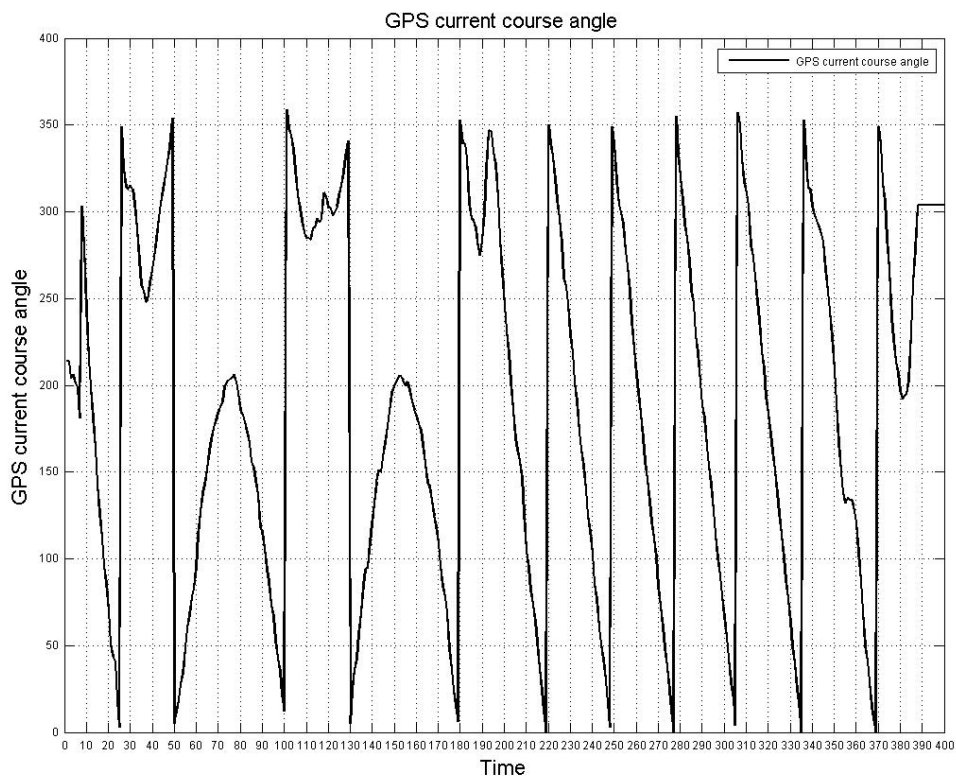


Рис. Б.20. Курс за GPS

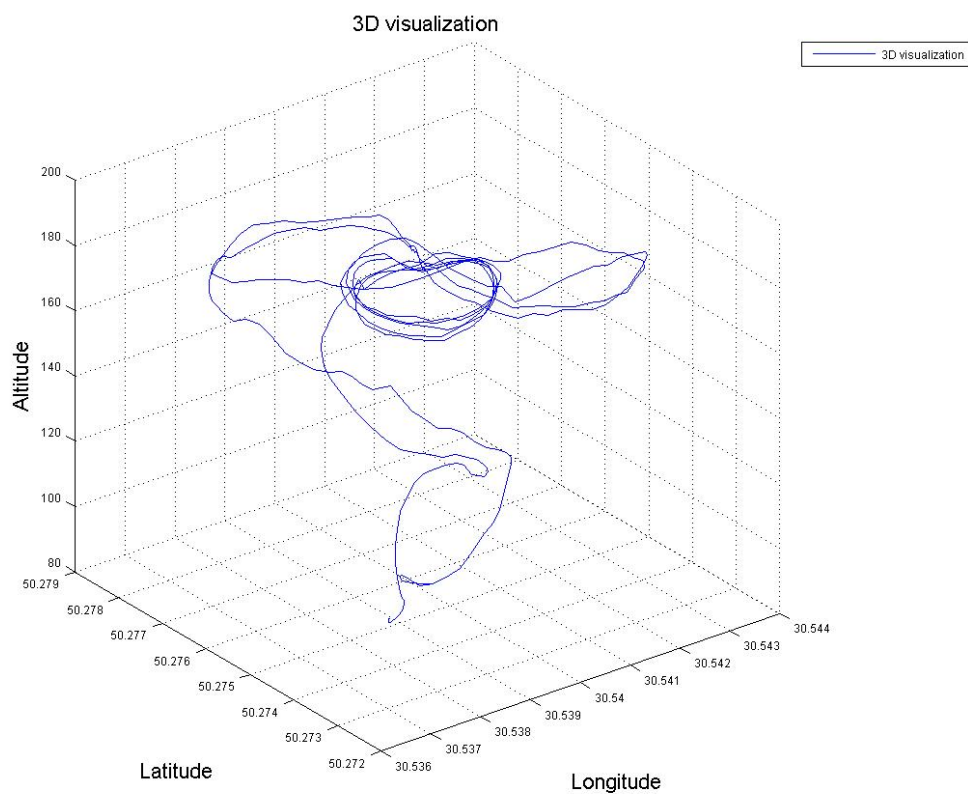


Рис. Б.21. Траекторія руху у тривимірному просторі

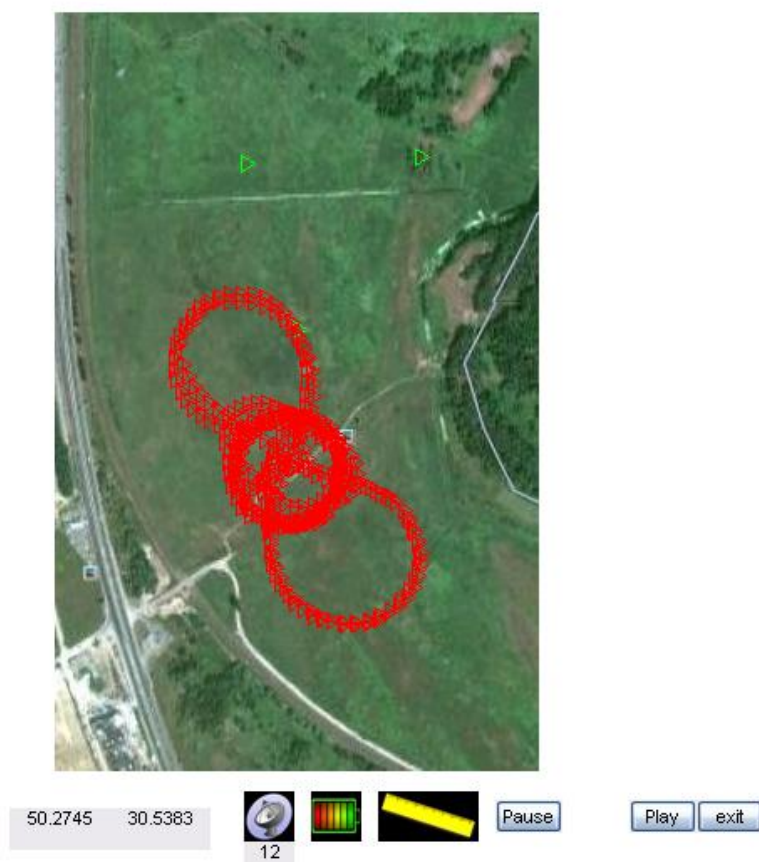


Рис. Б.22. Траекторія руху на карті місцевості

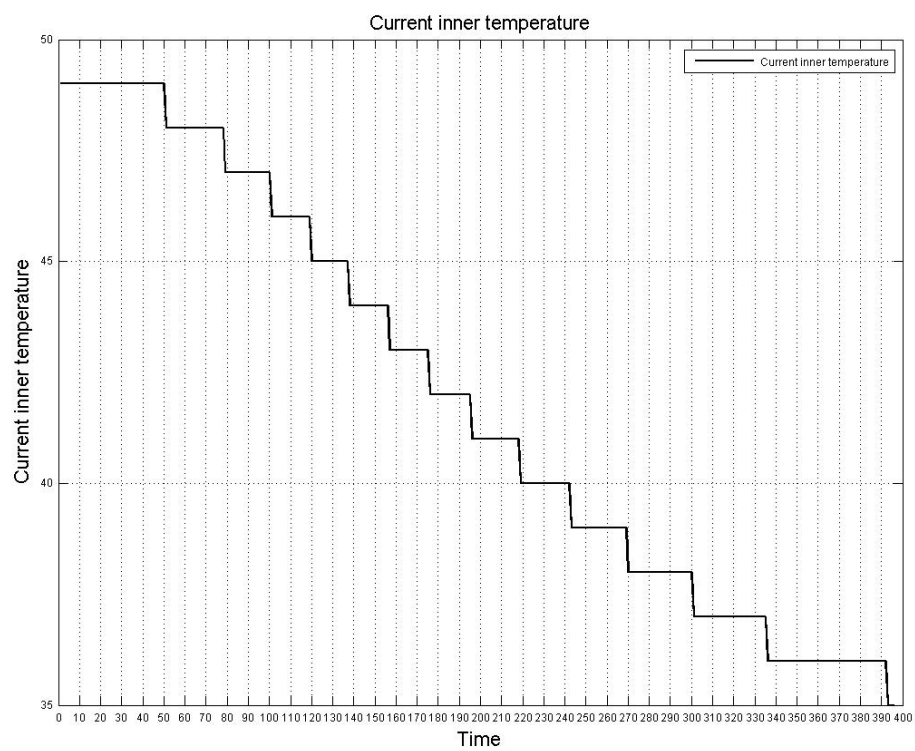


Рис. Б.23. Результати вимірювання температури

Додаток В.

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи, патент на корисну модель та свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. ректора Національного авіаційного
університету

В.М. Ісасенко

14.10
2016 р.



АКТ впровадження результатів дисертаційної роботи Кузьменко Наталії Сергіївни

Комісія у складі:

Ларіна В.Ю. – доктора технічних наук, професора – голова комісії, Кондратюк В.М. – директора ННЦ «Аерокосмічний центр» - член комісії, Коніна В.В – доктора технічних наук, професора кафедри АНС – член комісії,

склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук аспіранта кафедри аеронавігаційних систем Національного авіаційного університету Кузьменко Наталії Сергіївни на тему «Багатоальтернативною класифікацією польотних ситуацій» використані при виконанні НДР № 871–ДБ13 «Розробка методів та алгоритмів інтеграції датчиків навігаційної системи для управління безпілотним повітряним судном» впроваджені у ННЦ „Аерокосмічний центр”, а саме:

1. Метод багатопараметричного відновлення даних у безпілотній авіаційній системі.
2. Алгоритм пошуку аномальних значень у результатах вимірювань параметрів у безпілотній авіаційній системі.
3. Алгоритми декодування зафіксованих польотних даних безпілотного літального апарату у форматах «Hornet OSD», «MavLink», «OpenPilot».

Характеристика та форма впровадження: у вигляді програмного комплексу декодування та візуалізації польотних даних безпілотного літального апарату.

Новизна результатів роботи: розроблене програмне забезпечення дозволяє провести аналіз польотної ситуації шляхом декодування, обробки та візуалізації польотних даних, що фіксуються в файлах засобами наземної станції або в бортовій пам'яті безпілотного літального апарату. Окрім того, новий метод багатопараметричного відновлення втрачених польотних даних у БАС дозволяє оцінити відсутні чи аномальні значення параметрів за результатами їх попередніх вимірів та з урахуванням похибок вимірювального обладнання.

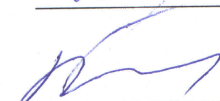
Акт не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських винагород і призначений для пред'явлення в спеціалізовану вчену раду.

Голова комісії

 Ларін В.Ю.

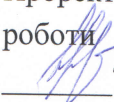
Члени комісії

 В.М.Кондратюк

 В.В. Конін

ПОГОДЖЕНО

Проректор з навчальної роботи


Т.В.Іванова
10.10 2016 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о ректора


В.М.Ісаєнко
12.10 2016 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів дисертаційної роботи Кузьменко Наталії Сергіївни

Комісія у складі:

Чепіженка В.І. – директора ННІАН, доктора технічних наук, професора – голова комісії, Ларіна В.Ю. – завідувача кафедри АНС, доктора технічних наук, професора - член комісії, Остроумова І.В. – кандидата технічних наук, доцента кафедри АНС – член комісії,

склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук аспіранта кафедри аеронавігаційних систем Національного авіаційного університету Кузьменко Наталії Сергіївни на тему «Багатопараметричне відновлення даних у безпілотній авіаційній системі з багатоальтернативною класифікацією польотних ситуацій» впроваджені та використовуються на кафедрі АНС Навчально-наукового інституту Аеронавігації (ННІАН) при проведенні учбового процесу:

- за дисципліною "Автоматизовані системи управління повітряним рухом" (в курс лекцій впроваджено аналіз та класифікацію критеріїв пошуку аномальних значень в результат вимірювань навігаційних сенсорів) (Модуль 3, лекція 3.4 відповідно до робочої навчальної програми дисципліни);
- за дисципліною "Автоматизація обробки інформації та керування повітряним рухом" (в курс лекцій впроваджено удосконалений метод багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій за оцінюванням апостеріорної ймовірності по формулі Байєса з використанням багатопараметричного нормального розподілу у якості умовної щільності ймовірності) (Модуль 4, лекція 4.4 відповідно до робочої навчальної програми дисципліни);

для спеціальності 7.100109 "Обслуговування повітряного руху" та 7/8.100118 "Системи аеронавігаційного обслуговування".

Голова комісії



В.І.Чепіженко

Члени комісії



В.Ю. Ларін



І.В. Остроумов

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 98724

**СПОСІБ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ЗА ІНФОРМАЦІЄЮ СИСТЕМИ
ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕНЬ ЛІТАКІВ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі **12.05.2015**.

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

А.Г. Жарінова



(21) Номер заявки: **u 2014 10941**

(22) Дата подання заявки: **07.10.2014**

(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **12.05.2015**

(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: **12.05.2015, Бюл. № 9**

(72) Винахідники:
Остроумов Іван Вікторович, UA,
Кузьменко Наталія Сергіївна, UA

(73) Власник:
НАЦІОНАЛЬНИЙ
АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ,
пр. Комарова, 1, м. Київ,
03680, UA

(54) Назва корисної моделі:

СПОСІБ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ЗА ІНФОРМАЦІЄЮ СИСТЕМИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕНЬ ЛІТАКІВ

(57) Формула корисної моделі:

Спосіб позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків, що полягає у розрахунку координат місцеположення повітряного корабля, який **відрізняється** тим, що координати місцеположення оточуючих літаків та відстані до них отримують від системи попередження зіткнень літаків у повітрі і від приймача автоматичного залежного спостереження режиму "ES" та розв'язують систему навігаційних рівнянь за допомогою лінеаризації.



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **98724** (13) **U**
(51) МПК (2015.01)
G01C 21/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2014 10941**
(22) Дата подання заявки: **07.10.2014**
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **12.05.2015**
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: **12.05.2015, Бюл.№ 9**

(72) Винахідник(и):
**Остроумов Іван Вікторович (UA),
Кузьменко Наталія Сергіївна (UA)**
(73) Власник(и):
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
пр. Комарова, 1, м. Київ, 03680 (UA)**

(54) СПОСІБ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ЗА ІНФОРМАЦІЄЮ СИСТЕМИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕНЬ ЛІТАКІВ

(57) Реферат:

Спосіб позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків полягає у розрахунку координат місцеположення повітряного корабля. Координати місцеположення оточуючих літаків та відстані до них отримують від системи попередження зіткнень літаків у повітрі і від приймача автоматичного залежного спостереження режиму "ES" та розв'язують систему навігаційних рівнянь за допомогою лінеаризації.

UA 98724 U

Корисна модель належить до способу визначення координат місцеположення повітряного корабля з використанням електромагнітного випромінювання, зокрема до сфери навігації та попередження зіткнень літаків у повітрі.

5 Способи позиціонування, розроблені на основі винаходу, можуть бути використанні у побудові систем попередження зіткнень літаків у повітрі та пристроїв позиціонування для визначення власного місцеположення як резервного джерела координатної інформації.

10 У багатьох випадках застосовують способи для визначення місцеположення рухомих об'єктів. Особливу роль системам позиціонування відводять на борту повітряного корабля для своєчасного визначення точних координат місцеположення. Як основний спосіб позиціонування на борту повітряного корабля застосовують системи, що ґрунтуються на застосуванні глобальних систем позиціонування, таких, як, наприклад, GPS, ГЛОНАСС, GALILEO. В основі цих глобальних навігаційних супутникових систем лежать способи позиціонування [1, 2], згідно з якими виконується приймання навігаційних сигналів від геостаціонарних навігаційних супутників, вимірювання відстаней від користувача до доступних у певному регіоні навігаційних супутників та розрахунок координат користувача шляхом розв'язку системи навігаційних рівнянь. Однак позиціонування за такими способами передбачає наявність принаймні чотирьох навігаційних супутників у зоні дії та можливості до прийому сигналів від них. У випадках відсутності можливості до прийому сигналів від навігаційних супутників застосовуються резервні способи позиціонування: інерційне [3], позиціонування за інформацією від обладнання всенаправлених радіомаяків VOR [4] позиціонування за інформацією від далекомірних радіомаяків DME [5], та їх комбінації. Кожному з резервних методів позиціонування притаманні певні недоліки, пов'язані з доступністю чи точністю визначення координат.

25 Застосування способів, що ґрунтуються на інерційних принципах [3] пов'язано з обмеженістю за часом використання та постійним зростанням похибки оцінювання координат. Відповідно до цього їх точність визначається за рівнем точності датчиків прискорень та гіроскопів, з урахуванням часу останнього оновлення координат від систем глобальної супутникової навігації.

30 Відомий спосіб точного визначення місцеположення з використанням сигналів високочастотних всеспрямованих радіомаяків [4], згідно з яким місцеположення повітряного корабля визначається за кутами напрямками на наземні радіомаяки та відомими координатами точного місцеположення антен наземних радіомаяків.

35 Точність цього способу залежить від взаємної геометрії розташування та кількості наземних радіомаяків, навігаційні сигнали яких доступні у повітряному просторі де перебуває повітряний корабель. Визначення координат місцеположення повітряного корабля передбачає наявність наземних радіомаяків, що не дозволяє застосовувати даний спосіб у переважній частині повітряного простору.

40 Відомий також, вибраний як прототип, є спосіб позиціонування за інформацією від далекомірних радіомаяків DME [5], передбачає розрахунок координат місцеположення повітряного корабля за відомою відстанню між повітряним кораблем та далекомірними радіомаяками DME, розміщених на земній поверхні та доступних у зоні дії бортового обладнання [6], з урахуванням точно відомих координат місцеположення передавальних антен наземних радіомаяків. Координати місцеположення повітряного корабля отримуються шляхом розв'язку навігаційного рівняння.

45 Однак даний спосіб передбачає наявність у зоні дії бортового обладнання DME, розміщених на земній поверхні радіомаяків. При цьому для способу точної навігаційної системи за інформацією DME [5] - достатнім є приймання сигналів від двох наземних радіомаяків, проте переважна більшість повітряного простору не покривається наземними далекомірними радіомаяками, через це даний спосіб позиціонування не може бути застосований у повітряному просторі за відсутності наземних радіомаяків DME поблизу. Крім того, точність позиціонування залежить від геометрії взаємного розташування наземних радіомаяків та повітряного корабля.

50 Доступність та точність способів позиціонування на борту повітряного корабля відіграють важливу роль, оскільки прямо впливають на безпеку повітряного руху.

55 В основі корисної моделі поставлена задача розрахунку координат місцеположення літака у повітрі, під час польоту, за умови відсутності можливості використання глобальної супутникової системи позиціонування, систем позиціонування за наземними кутомірними чи далекомірними радіомаяками за відомими координатами базових точок, за які використовуються оточуючі літаки та відстані до них.

60 Поставлена задача вирішується тим, що спосіб позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків, що полягає у розрахунку координат місцеположення повітряного корабля, згідно з корисною моделлю, координати місцеположення оточуючих літаків та відстані

до них отримують від системи попередження зіткнень літаків у повітрі і від приймача автоматичного залежного спостереження режиму "ES" та розв'язують систему навігаційних рівнянь за допомогою лінеаризації.

5 Тут і надалі під системою попередження зіткнень літаків у повітрі позначається система, що визначає місцеположення оточуючих літаків, що знаходяться у зоні її дії відносно до власного за рахунок вимірювання відстані та напрямку автономними засобами з подальшою індикацією на дисплеї пілота чи використанням цієї інформації у алгоритмах виявлення потенційно-можливої конфліктної ситуації та розрахунку траєкторії її уникнення.

10 Відповідно до сучасних вимог, що висуваються до літаків цивільної авіації, до складу обладнання має входити система попередження зіткнень літаків у повітрі у певній її модифікації. Подібні системи містять у своєму складі обладнання взаємодії з літаковими відповідачами та у алгоритмах своєї роботи вимірюють відстань до оточуючих літаків у межах дії системи, крім того, інформація, щодо місцеположення літаків отримується від систем автоматичного залежного спостереження у широкомовному режимі чи міститься у повідомленні літакового
15 відповідача. Тим самим вихідні дані для оцінки власного місцеположення наявні у системах літака та доступні для використання. При цьому слід врахувати, що для визначення координат шляхом розв'язки системи навігаційних рівнянь необхідно, щонайменше мати координати та дальності до трьох літаків. Точність визначення координат залежить від точності інформації, щодо місцеположення сусідніх літаків та взаємного геометрії розташування.

20 Крім того, згідно з корисною моделлю, інформація стосовно місцеположення навколишніх літаків отримується після приймання та декодування повідомлень літакових відповідачів, що передаються на частоті 1090 МГц. у режимі S за запитом від антен системи попередження зіткнень літаків у повітрі TCAS та режимі ES (ES-extended squitter), що періодично випромінюються та відповідають вимогам автоматичного залежного спостереження у
25 широкомовному режимі.

Заявлений спосіб здійснюється таким чином.

Спосіб позиціонування базується на використанні інформації, що отримують від системи попередження зіткнень літаків у повітрі. Відповідно до принципів роботи через певні проміжки часу генерують сигнали запиту на частоті 1030 МГц та випромінюють їх у простір. Отримують
30 сигнали запиту приймачами літакових відповідачів режиму "S", розміщених на повітряних кораблях, що знаходяться у зоні дії системи попередження зіткнень літаків у повітрі. Через певний проміжок часу генерують та випромінюють у простір сигнали відповіді на частоті 1090 МГц. У відповіді міститься інформація про ідентифікаційний номер, абсолютну та відносну висоту, координати місцеположення повітряного корабля та інші дані. Приймають сигнали
35 відповіді та декодують інформацію, закладену в них системою попередження зіткнень літаків. Прийнятну інформацію опрацьовують для визначення відносного місцеположення оточуючих повітряних кораблів та реалізують функції попередження зіткнень літаків у повітрі. Слід зазначити, що при реалізації функції попередження зіткнень отримують точні відстані, кути напрямку та координати місцеположення оточуючих літаків. Як резервне джерело координат
40 місцеположення оточуючих літаків використовують приймачі сигналів автоматичного залежного спостереження, що працюють за режимом "ES". Інформацію від них отримують через певні проміжки часу з випроміненого у простір радіосигналу, що містить інформацію відносно власного місцеположення повітряного корабля та інші дані. Прийнятий сигнал декодують та екстрагують інформацію, що міститься у його повідомленнях. Точні відстані та координати
45 місцеположення оточуючих літаків отримані з повідомлень режиму "S" чи режиму "ES", у разі наявності, використовують як вхідні дані для алгоритму розв'язання навігаційного рівняння.

Визначають координати місцеположення повітряного корабля (x_0, y_0, z_0) у глобальній геоцентричній системі координат ECEF у випадку наявної необхідної кількості літаків навколо (більше двох), за рахунок розв'язання навігаційного рівняння виду:

$$50 \quad D_i^2 - (x_0 - x_{пкі})^2 + (y_0 - y_{пкі})^2 + (z_0 - z_{пкі})^2,$$

де $x_{пкі}$, $y_{пкі}$, $z_{пкі}$ - координати місцеположення і-го повітряного корабля; D_i - похила відстань до і-го ПК.

Розв'язок системи нелінійних навігаційних рівнянь отримують за допомогою лінеаризації системи рівнянь з застосуванням методу найменших квадратів для пошуку невідомих величин.
55 Для цього вводять низку допоміжних величин:

$$\Delta D_i = \hat{D}_i - D_i,$$

$$\Delta x_i = \hat{x}_i - x_0, \quad \Delta y_i = \hat{y}_i - y_0, \quad \Delta z_i = \hat{z}_i - z_0,$$

$$\hat{r}_i^2 = (x_0 - \hat{x}_i)^2 + (y_0 - \hat{y}_i)^2 + (z_0 - \hat{z}_i)^2,$$

$$a_{xi} = \frac{x_{ПК} - \hat{x}_i}{\hat{r}_i^2}, \quad a_{yi} = \frac{y_{ПК} - \hat{y}_i}{\hat{r}_i^2}, \quad a_{zi} = \frac{z_{ПК} - \hat{z}_i}{\hat{r}_i^2},$$

де $\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i$ - координати номінальних точок, ΔD - відстань від номінальної точки до ПК.
З урахуванням цього навігаційне рівняння представляють у матричному лінеаризованому

5 вигляді:

$$\Delta D = H \Delta X,$$

де

$$\Delta D = \begin{pmatrix} \Delta D_1 \\ \Delta D_2 \\ \vdots \\ \Delta D_N \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} a_{x1} & a_{y1} & a_{z1} \\ a_{x2} & a_{y2} & a_{z2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{xN} & a_{yN} & a_{zN} \end{pmatrix}, \quad \Delta X = \begin{pmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{pmatrix}, \quad i = 1..N.$$

Розв'язання лінійної системи рівнянь отримують у вигляді:

10
$$\Delta X = (H^T H)^{-1} H^T \Delta D.$$

Як інструмент для вимірювання відстані до сусідніх літаків можуть використовувати системи попередження зіткнень літаків у повітрі TCAS, що застосовують активний метод спостереження повітряного руху.

15 Реалізація способу позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків у повітрі, приймача сигналів автоматичного залежного спостереження у режимі "ES" та обчислювача, що реалізує розв'язок навігаційного рівняння. Операції з розв'язку навігаційного рівняння можуть виконуватись усередині обчислювальної системи літаководіння чи у обчислювачі системи

20 попередження зіткнень літаків у повітрі.
Спосіб позиціонування, згідно з корисною моделлю, забезпечує визначення координат місцеположення повітряного корабля у випадку відмови чи недоступності супутникової системи позиціонування та резервних алгоритмів позиціонування за інформацією від наземних навігаційних радіомаяків, таким чином забезпечується постійна наявність інформації, щодо власного місцеположення, що підвищує рівень безпеки виконання польотів літаків.

25 Джерела інформації:

1. А.с. США. № US5077557 A, US 07/460.914. 1991.
2. А.с. України. № UA101991, МПК G01S 5/14. 2009.
3. А.с. США. № WO2008147232 A1, PCT/PT2007/000021. 2008.
4. А.с. США. № US8179318 B1, US 12/556,714. 2012.
- 30 5. А.с. США. № US4583177 A, US 06/453,671. 1986.
6. А.с. США. № US4642639 A, US 06/537,879. 1987.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

35 Спосіб позиціонування за інформацією системи попередження зіткнень літаків, що полягає у розрахунку координат місцеположення повітряного корабля, який відрізняється тим, що координати місцеположення оточуючих літаків та відстані до них отримують від системи попередження зіткнень літаків у повітрі і від приймача автоматичного залежного спостереження режиму "ES" та розв'язують систему навігаційних рівнянь за допомогою лінеаризації.

40

УКРАЇНА



УКРАЇНА • U

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

• УКРАЇНА

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 57944

Комп'ютерна програма "Візуалізація параметрів безпілотних літальних апаратів"

(вид, назва службового твору)

Автор(и) **Богуненко Микола Миколайович, Кузьменко Наталія Сергіївна, Шостак Олена Вікторівна, Шарак Катерина Юріївна**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать **Національний авіаційний університет, пр-т Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03680**

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

30.12.2014

Дата реєстрації



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України

А.Г.Жарінова

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**
Україна, 03680, МСП, м. Київ-35,
вул. Урицького, 45
Тел. (044) 494-06-06
Факс (044) 494-06-67
E-mail: post@sips.gov.ua



**STATE INTELLECTUAL
PROPERTY SERVICE
OF UKRAINE**
Ukraine, 03680, MSP, Kyiv-35,
45, Urytskogo str.
Tel. (044) 494-06-06
Fax (044) 494-06-67
E-mail: post@sips.gov.ua

Р І Ш Е Н Н Я

ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР

Державна служба інтелектуальної власності розглянула заяву
Національний авіаційний університет, пр-т Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03680

(повне ім'я фізичної або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

заявка від 05.11.2014 № 58290

про реєстрацію авторського права на твір і прийняла рішення зареєструвати авторське право на службовий твір **Комп'ютерна програма "Візуалізація параметрів безпілотних літальних апаратів"; Богуненко Микола Миколайович, Кузьменко Наталія Сергіївна, Шостак Олена Вікторівна, Шарак Катерина Юріївна; Національний авіаційний університет**

(вид, повна, скорочена (за наявності) назва твору, повне ім'я, псевдонім (за наявності) автора (ів), повна офіційна назва роботодавця)

Внесення відомостей до Державного реєстру свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір та видача свідоцтва будуть здійснені за умови сплати збору за оформлення і видачу свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір відповідно до п.3 постанови Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2001 року № 1756 "Про державну реєстрацію авторського права і договорів, які стосуються права на твір".

Якщо протягом трьох місяців від дати одержання заявником рішення про реєстрацію авторського права на твір Державна служба не одержала документ про сплату збору за оформлення і видачу свідоцтва у розмірі та порядку, визначених законодавством, або копію документа, що підтверджує право на звільнення від сплати зазначеного збору, заявка вважається відхиленою і реєстрація авторського права та публікація відомостей про реєстрацію Державною службою не проводиться.

Голова Державної служби
інтелектуальної власності



А.Г. Жарінова

УКРАЇНА



УКРАЇНА • U

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

• UKRAINE

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 58313

Комп'ютерна програма "Програмне забезпечення для декодування та візуалізації польотних даних" ("UAVDATADecoder")

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Харченко Володимир Петрович, Кузьменко Наталія Сергіївна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Національний авіаційний університет, пр-т Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03680

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

Дата реєстрації

27.01.2015



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України

А.Г.Жарінова

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**
Україна, 03680, МСП, м. Київ-35,
вул. Урицького, 45
Тел. (044) 494-06-06
Факс (044) 494-06-67
E-mail: post@sips.gov.ua



**STATE INTELLECTUAL
PROPERTY SERVICE
OF UKRAINE**
Ukraine, 03680, MSP, Kyiv-35,
45, Urytskogo str.
Tel. (044) 494-06-06
Fax (044) 494-06-67
E-mail: post@sips.gov.ua

Р І Ш Е Н Н Я

ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР

**Державна служба інтелектуальної власності розглянула заяву
Національний авіаційний університет, пр-т Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03058**

(повне ім'я фізичної або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

заявка від 28.11.2014 № 58672

про реєстрацію авторського права на твір і прийняла рішення зареєструвати авторське право на службовий твір **Комп'ютерна програма "Програмне забезпечення для декодування та візуалізації польотних даних" ("UAVDATADecoder"); Харченко Володимир Петрович, Кузьменко Наталія Сергіївна; Національний авіаційний університет**

(вид, повна, скорочена (за наявності) назва твору, повне ім'я, псевдонім (за наявності) автора (ів), повна офіційна назва роботодавця)

Внесення відомостей до Державного реєстру свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір та видача свідоцтва будуть здійснені за умови сплати збору за оформлення і видачу свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір відповідно до п.3 постанови Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2001 року № 1756 "Про державну реєстрацію авторського права і договорів, які стосуються права на твір".

Якщо протягом трьох місяців від дати одержання заявником рішення про реєстрацію авторського права на твір Державна служба не одержала документ про сплату збору за оформлення і видачу свідоцтва у розмірі та порядку, визначених законодавством, або копію документа, що підтверджує право на звільнення від сплати зазначеного збору, заявка вважається відхиленою і реєстрація авторського права та публікація відомостей про реєстрацію Державною службою не проводиться.

**Голова Державної служби
інтелектуальної власності**



А.Г. Жарінова

УКРАЇНА



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА

ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 58315

Комп'ютерна програма "Програмний комплекс уникнення зіткнень рухомих об'єктів з перешкодами" ("UAV collision avoidance")

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Харченко Володимир Петрович, Кузьменко Наталія Сергіївна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Авторські майнові права належать Національний авіаційний університет, пр-т Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03680

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

27.01.2015

Дата реєстрації



Голова Державної служби
інтелектуальної
власності України
А.Г.Жарінова

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ УКРАЇНИ**

Україна, 03680, МСП, м. Київ-35,
вул. Урицького, 45
Тел. (044) 494-06-06
Факс (044) 494-06-67
E-mail: post@sips.gov.ua



**STATE INTELLECTUAL
PROPERTY SERVICE
OF UKRAINE**

Ukraine, 03680, MSP, Kyiv-35,
45, Urytskogo str.
Tel. (044) 494-06-06
Fax (044) 494-06-67
E-mail: post@sips.gov.ua

Р І Ш Е Н Н Я

ПРО РЕЄСТРАЦІЮ АВТОРСЬКОГО ПРАВА НА ТВІР

**Державна служба інтелектуальної власності розглянула заяву
Національний авіаційний університет, пр-т Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03058**

(повне ім'я фізичної або повне офіційне найменування юридичної особи, адреса)

заявка від 28.11.2014 № 58674

про реєстрацію авторського права на твір і прийняла рішення зареєструвати авторське право на службовий твір **Комп'ютерна програма "Програмний комплекс уникнення зіткнень рухомих об'єктів з перешкодами" ("UAV collision avoidance"); Харченко Володимир Петрович, Кузьменко Наталія Сергіївна; Національний авіаційний університет**

(вид, повна, скорочена (за наявності) назва твору, повне ім'я, псевдонім (за наявності) автора (ів), повна офіційна назва роботодавця)

Внесення відомостей до Державного реєстру свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір та видача свідоцтва будуть здійснені за умови сплати збору за оформлення і видачу свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір відповідно до п.3 постанови Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2001 року № 1756 "Про державну реєстрацію авторського права і договорів, які стосуються права на твір".

Якщо протягом трьох місяців від дати одержання заявником рішення про реєстрацію авторського права на твір Державна служба не одержала документ про сплату збору за оформлення і видачу свідоцтва у розмірі та порядку, визначених законодавством, або копію документа, що підтверджує право на звільнення від сплати зазначеного збору, заявка вважається відхиленою і реєстрація авторського права та публікація відомостей про реєстрацію Державною службою не проводиться.

**Голова Державної служби
інтелектуальної власності**



А.Г. Жарінова