

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-
КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

КОВАЛЕНКО ЮЛІЯ БОРИСІВНА



УДК 004.415.2:629.7.05

**ІНФОРМАЦІЙНА ПІДТРИМКА ПРОЦЕСУ ПРОЕКТУВАННЯ ТА
ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОМПЛЕКСУ БОРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ
ІНТЕГРОВАНОЇ МОДУЛЬНОЇ АВІОНІКИ**

Спеціальність 05.13.06 «Інформаційні технології»

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному некомерційному підприємстві «Державний університет «Київський авіаційний інститут».

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Кравченко Юрій Васильович

Київський національний університет

імені Тараса Шевченка, завідувач кафедри мережеских та інтернет технологій факультету інформаційних технологій

доктор технічних наук, професор

Машков Олег Альбертович

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, професор кафедри екологічної безпеки

доктор технічних наук, професор

Субач Ігор Юрійович

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач Спеціальної кафедри № 5 Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації

Захист відбудеться «22» липня 2025 р. о 14⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.861.05 у Державному університеті інформаційно-комунікаційних технологій за адресою: 03110, м. Київ, вул. Солом'янська, 7, конференц-зал.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій за адресою: 03110, м. Київ, вул. Солом'янська, 7.

Реферат розісланий «23» червня 2025 року.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.861.05

кандидат педагогічних наук, доцент



Вікторія КОРЕЦЬКА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку вітчизняна авіаційна промисловість підходить до створення повітряних суден (ПС) нового покоління. Ключова роль у створенні ПС нового покоління відводиться створенню нової універсальної обчислювальної системи (ОС). Універсальна ОС входить до складу ряду авіаційних комплексів (пілотажний, навігаційний та ін.), які керують рухом ПС в польоті, і розробляється відповідно до концепції, що отримала назву «інтегрована модульна авіоніка» (ІМА), докладно викладеної в групі стандартів ARINC 651-655.

Стандарти ARINC 651-655 регламентують порядок розробки компонентів апаратного і програмного забезпечення (ПЗ), з яких в подальшому будується універсальна ОС для авіаційного застосування. Реалізація запропонованих в стандартах ідей передбачає надання ОС ІМА:

якісно нових експлуатаційних властивостей;

підвищених значень техніко-економічних показників в порівнянні з існуючими сьогодні обчислювальними системами (ОС четвертого покоління), що знаходяться в експлуатації.

Практичний досвід розробки ОС четвертого покоління і перспективних ОС ІМА показав суттєві відмінності в принципах їх структурної організації та виявив об'єктивну потребу сучасного виробництва в створенні нових методів та засобів автоматичного та автоматизованого контролю, спеціалізованих під обчислювальні системи ІМА і забезпечують властивість реконфігурації ОС при виникненні відмов у польоті.

Прийняті в ОС четвертого покоління технічні рішення в області організації засобів контролю виявляються непридатними для створення засобів контролю перспективних ОС, в зв'язку з чим актуальною є задача створення і дослідження методів і засобів контролю ОС, спеціалізованих під ОС ІМА.

На тлі успішного досвіду зарубіжних досліджень провідних компаній: Astronautics Corporation of America, Aerospace Display Systems Inc., Planar Systems Inc., Thales, Honeywell (у складі колишнього Allied Signal), Collins Aerospace та інших — що реалізуються під егідою Об'єднаного комітету зі стандартизації архітектури авіаційних комплексів ASAAC (Allied Standard Avionics Architecture Council), у рамках програм розробки концепцій бортового радіоелектронного обладнання (БРЕО) нового покоління — зокрема DAIS, Pave Pillar, JSF (Joint Strike Fighter), MASA (Modular Avionics System Architecture), ISS (Integrated Sensor System), SEM (Standard Electronic Module) та AAAP (Advanced Avionics Architecture and Packaging) — формується єдиний підхід до побудови архітектури авіоніки нового покоління.

В Україні ведеться пошук нових наукових напрямів розвитку БРЕО, дослідження наукових основ проектування та управління якістю проектних робіт, методології побудови і функціонування ЕО, здатних забезпечити якісний і довготривалий пріоритет вітчизняних розробок в цільовій ефективності та конкурентоспроможної боротьбі.

Детальне опрацювання методів і засобів проектування, оптимальна

комбінація – сукупності функціональних систем в єдиний комплекс вимагає створення наскрізної технології автоматизованого синтезу, що забезпечує зниження невизначеності в оцінці основних властивостей розроблюваних систем до рівня, що дозволяє здійснити обґрунтований вибір найкращого варіанту структури і параметрів БРЕО, а також окремих видів його підсистем вже на початковому етапі – етапі ескізного проектування.

Зазначена проблема обумовлюється об'єктивним протиріччям між існуючими засобами інформаційної підтримки, які обмежені у своїй функціональності та можливістю створення цільової інформаційної підтримки інформаційних систем нового покоління, оскільки існуючі системи не можуть задовольнити нові вимоги, які потребують використання сучасних технологій та стандартів для забезпечення високої гнучкості, масштабованості та автоматизації. Це ускладнює реалізацію ефективної та сучасної системи інформаційної підтримки для бортового радіоелектронного обладнання також, гармонізація базових засобів інформаційної підтримки процесів проектування та експлуатації бортового радіоелектронного обладнання з засадами інтегрованої модульної авіоніки. Забезпечення високої модульності та гнучкості системи призводить до збільшення складності, вартості та часу на сертифікацію, що негативно впливає на її надійність та продуктивність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до планів наукової і науково-технічної діяльності Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут» та в межах виконання науково-дослідної роботи № 5-2024/18.02 «Система забезпечення кібербезпеки та стійкості об'єктів критичної інфраструктури» (термін виконання: 01.03.2024 – 30.06.2025).

Тематика дослідження відповідає основним науковим напрямам і важливим проблемам фундаментальних досліджень у галузі природничих і технічних наук, затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 11 січня 2018 р. № 13. Результати дослідження також узгоджуються з положеннями Стратегії розвитку вітчизняної авіаційної промисловості на період до 2020 року (розпорядження КМУ від 27 грудня 2008 р. № 1656) та Державної цільової науково-технічної програми розвитку авіаційної промисловості на 2021—2030 роки (постанова КМУ від 01 вересня 2021 р. № 951).

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у навчальний процес кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут» для підготовки здобувачів ступеня бакалавра та доктора філософії за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» (акт від 20.05.2024 р.). Результати інтегровані до викладання дисциплін:

- «Методи забезпечення надійності та ефективності експлуатації сучасних телекомунікаційних та радіотехнічних систем»;
- «Основи теорії надійності, експлуатації та ремонту інформаційно-телекомунікаційних та радіотехнічних систем».

А також у діяльність товариства з обмеженою відповідальністю «СІТОН ДІДЖИТАЛ», зокрема шляхом практичного застосування результатів

дисертаційного дослідження при розробленні апаратно-програмного комплексу підтримки авіаційних систем (акт впровадження від 15.04.2025 р.).

Мета дисертаційної роботи полягає в підвищенні ефективності інформаційної підтримки процесів проектування та експлуатації бортового обладнання гармонізованих з засадами інтегрованої модульної авіоніки.

Оскільки, умови функціонування сучасних ПС відрізняються високими швидкостями, великими висотами і дальностями польоту, дією різноманітних і численних зовнішніх чинників. Разом з тим вимоги до точності і надійності навігаційного обладнання зростають. Умови, в яких використовується комплексне бортове обладнання, накладають жорсткі обмеження на фізичні, технічні та експлуатаційні характеристики систем. Однією з найважливіших проблем при експлуатації бортового обладнання ПС є оцінка стану апаратури комплексу, діагностика її відмов і управління функціонуванням всієї апаратури як відповідно до її станом, так і відповідно до поточних зовнішніх умов. Для цього застосовуються різні системи підвищення відмовостійкості, завадозахисту і контролю на різних етапах експлуатації бортового обладнання. Використовуються ієрархічні системи, що добре зарекомендували себе на практиці, в яких оцінюється працездатність і достовірність інформації окремих систем і комплексу бортового обладнання в цілому. Однак для забезпечення збереження працездатності бортового обладнання доцільно не лише фіксувати момент відмови систем, а й прогнозувати виникнення потенційно аварійних ситуацій, а також визначати інтервали недостовірної роботи обладнання. Застосування апріорних прогностичних моделей для вирішення цієї задачі потребує проведення тривалих і вартісних експериментальних досліджень, не враховує індивідуальні особливості конкретних бортових систем і не забезпечує ефективного контролю стану ПС. Тому для підвищення відмовостійкості і здійснення контролю бортового устаткування ПС доцільно використовувати комплексні системи контролю на базі динамічних експертних систем (ДЕС), які дозволяють враховувати режими польоту ПС, мають базу даних і оціночні критерії. Застосування ДЕС на борту ПС пов'язане зі складнощами реалізації, вимогами підвищеної продуктивності БРЕО.

Досягнення вказаної мети є необхідним для розвитку методів підвищення ефективності розробки КБО, споруджуваних на основі архітектури ІМА на ранніх стадіях процесу проектування, методів побудови та оптимізації структури функцій КБО ІМА, систем автоматизованого проектування для побудови та оптимізації структури функцій КБО ІМА.

Завдання дисертаційного дослідження:

1. Проаналізувати сучасні засоби інформаційної підтримки процесу проектування та експлуатації комплексу бортового обладнання.
2. Розробити метод підтримки процесу проектування інтегрованої модульної авіоніки для формалізації процесу визначення множини параметрів побудови комплексів бортового обладнання нового покоління.

3. Розробити модель процесу проектування комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки для побудови математичних методів підвищення надійності та відмовостійкості на етапі проектування.

4. Розробити графову модель структури функцій комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки вхідних і вихідних параметрів для реалізації обчислювальної потужності, навантаження на мережу передачі даних.

5. Розробити структурну модель процесу проектування складних автоматизованих систем управління комплексу бортового обладнання для вирішення проблеми виявлення несправностей автоматизованих систем, встановити взаємозв'язок щодо виявлення аналогічностей та появи помилок такого типу, повідомити та сформулювати звіт.

6. Розробити структурно-логічну модель уніфікованого автоматизованого робочого місця для підвищення достовірності контролю обчислювальної системи інтегрованої модульної авіоніки.

7. Розробити методи оцінки ймовірності безвідмовної роботи структурно-логічної моделі уніфікованого автоматизованого робочого місця для контролю функціональних елементів обчислювальної інтегрованої модульної авіоніки на виробництві.

8. Розробити інформаційну технологію для підвищення відмовостійкості бортового обладнання.

9. Розробити алгоритм контролю обчислювальної системи інтегрованої модульної авіоніки під час польоту повітряного судна для контролю функціональних елементів та подальшої розробки програмного забезпечення у складі уніфікованого робочого місця обчислювальної системи інтегрованої модульної авіоніки.

10. Розробити, експериментально дослідити та впровадити в практику алгоритмічне, програмне забезпечення інформаційної підтримки процесів проектування та експлуатації бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки для верифікації створених методів та моделей.

Об'єктом дослідження є процес проектування та експлуатації комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки.

Предметом дослідження є засоби інформаційної підтримки процесу проектування та експлуатації комплексу бортового обладнання.

Методи дослідження. Дисертаційне дослідження ґрунтується на системному аналізі результатів сучасних теоретичних і прикладних розробок українських і зарубіжних вчених у галузі інформаційних технологій, автоматизованих систем управління та авіоніки. Під час виконання дослідження використано методи системного аналізу та теорії управління для формалізації процесу проектування ІМА, логіко-імовірнісні та статистичні методи для оцінки безвідмовності й відмовостійкості елементів обчислювальної системи, методи дискретної математики та графової теорії для побудови структурно-функціональних моделей, методи теорії обробки спостережень для аналізу результатів експериментів, методи аналітичного та математичного моделювання для створення моделей процесів, а також методи

програмної інженерії для реалізації інформаційної технології підтримки проектування та експлуатації бортового обладнання.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено метод підтримки процесу проектування інтегрованої модульної авіоніки, в якому за рахунок виокремлення етапів: ескізного проектування, формуванні вимог процесу оцінки безпеки, верифікації процесу оцінки безпеки та виділення окремої проектною процедури генерування структури функцій комплексу бортового обладнання, дозволило формалізувати процес визначення множини параметрів для побудови комплексів бортового обладнання нового покоління.

2. Удосконалено модель процесу проектування комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки, в якій за рахунок узагальнених функцій верхнього рівня та первинних даних про їх структуру, окремої процедури процесу проектування формалізації та типізації структури функцій, на основі Марківських процесів дозволяє підвищити відмовостійкість на ранніх стадіях проектування.

3. Вперше розроблено графову модель структури функцій комплексу бортового обладнання, яка, використовуючи теорію графів, дозволяє пов'язати множини вхідних і вихідних параметрів функцій модулів та їх груп, визначити необхідну кількість обчислювальних модулів, рівні гарантії проектування кожного модуля, а також обсяг і характер даних, що передаються мережею в межах обчислювальної інфраструктури ІМА.

4. Вперше розроблена структурна модель процесу проектування складних автоматизованих систем управління комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки, в якій за рахунок модернізації спеціалізованих контролерів універсальними модулями забезпечення незалежної роботи різних авіаційних систем, та інтеграції підсистеми віртуальних з'єднань внутрішньої комутованої мережевої інфраструктури, при підтримці технологій, AFDX (Avionics Full Duplex Switched Ethernet) і CAN (Controller area network), на основі теорії ймовірності, дозволило обґрунтувати основні етапи проектування так експлуатації та компоненти автоматизованих систем управління бортового обладнання, підвищити ймовірність виявлення несправностей автоматизованих систем.

5. Вперше розроблена структурно-логічну модель уніфікованого автоматизованого робочого місця, в якій за рахунок застосування модульного принципу розділення модулів-тестів за функціональною залежністю кожного тестуючого елемента, та процедури мажорювання результатів контролю кожного функціонального елемента обчислювальної системи, дозволяє підвищувати достовірність контролю обчислювальної системи інтегрованої модульної авіоніки.

6. Вперше розроблено метод оцінки ймовірності безвідмовної роботи структурно-логічної моделі уніфікованого автоматизованого робочого місця обчислювальної системи інтегрованої модульної авіоніки, в якій за рахунок аналітичних процедур реалізації процесів резервування на рівні однотипних функціональних модулів та окремої процедури ковзного резервування на рівні

ідентичних функціональних модулів контролю функціональних елементів обчислювальної інтегрованої модульної авіоніки, дозволило підвищити у сукупності достовірність контролю обчислювальної системи інтегрованої модульної авіоніки.

7. Вперше розроблено інформаційну технологію, в якій за рахунок методу підтримки процесу проектування інтегрованої модульної авіоніки, моделей процесу проектування та графової моделі структури функцій комплексу бортового обладнання, та враховуючи структурну модель процесу проектування складних автоматизованих систем управління комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки, з врахуванням методів прогнозування, апіорно-математичної моделі редукованої динамічної експертної системи, дозволила підвищити відмовостійкість та надійність бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані в дисертаційній роботі результати можуть бути використані для побудови та оптимізації структури функцій комплексу бортового обладнання дозволяють ефективно провести роботи по формуванню структури комплексу на ранніх стадіях процесу проектування, що в результаті призводить до: зниження кількості помилок на ранніх стадіях проектування; зниження трудовитрат на усунення помилок, які виникають на ранніх стадіях проектування; зниження часових витрат на усунення помилок, які виникають на ранніх стадіях проектування; підвищення ефективності виконання робіт в рамках ескізного етапу проектування; скорочення загального часу проектування комплексу бортового обладнання; зниження вартості процесу проектування.

На основі запропонованої інформаційної технології, розроблено комплекс алгоритмів, що дозволяють обчислювати прогнозовані значення похибок систем авіоніки бортового обладнання та запобігають виходу з діапазону стійкої роботи, а також забезпечують працездатність і відмовостійкість обладнання повітряних суден.

На основі запропонованої структурно-логічної моделі уніфікованого автоматизованого робочого місця розроблено апаратно-програмний комплекс, призначений для підтримки процесу створення спеціалізованого програмного забезпечення, що забезпечує реалізацію алгоритмів контролю функціональних елементів операційної системи інтегрованої модульної авіоніки.

Розроблено апаратно-програмний комплекс для контролю і діагностики функціональних елементів обчислювальної системи інтегрованої модульної авіоніки, що функціонують в нормальних і спеціальних умовах експлуатації, що дає можливість реалізувати програмне забезпечення, інформаційно-вимірjuвального та алгоритмічного забезпечення.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У роботах, що написані у співавторстві, автору належать: [1-11, 13-16, 18, 20-28] – результати які отримані особисто; [2] – постановка задачі дослідження та аналіз інформаційної підтримки процесу проектування та експлуатації БРЕО; [8-9] – розробка методів і моделей підтримки процесу проектування

інтегрованої модульної авіоніки комплексів бортового обладнання нового покоління; [16-18] – запропоновано інформаційну технологію для підвищення відмовостійкості бортового обладнання; [26-30] – розроблено алгоритм контролю обчислювальної системи інтегрованої модульної авіоніки під час польоту повітряного судна для контролю функціональних елементів та подальшої розробки програмного забезпечення у складі уніфікованого робочого місця обчислювальної системи інтегрованої модульної авіоніки. З робіт, опублікованих у співавторстві, для вирішення проблеми та задач, поставлених у дисертаційному дослідженні, використовуються результати отримані особисто здобувачем наукового ступеня.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційних досліджень доповідалися й обговорювалися на таких конференціях і семінарах: Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми наук» (Київ, НАУ, 2013 – 2025 рр.); Науково-практична конференція «Актуальні питання забезпечення кібернетичної безпеки та захисту інформації» (с. Верхнє Студене, Європейський університет, 2018 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «ITSEC» (Київ, НАУ, 2013 – 2023 рр.); Міжнародна науково-технічна конференція «ABIA» (Київ, НАУ, 2013 – 2019 рр.); Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка» 2017 – 2021 рр.); Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК)» (Київ, НАУ, 2015 – 2019 рр.); Науково-практичний семінар «Технічні засоби захисту інформації» (Київ, Національна Академія Наук України, 2017 – 2021рр.). Ось перелік деяких з них:

Коваленко Ю.Б. Новітні технології управління корпоративним інформаційним контентом. ABIA-2015 : XII міжнар. наук.-техн. конф., 28-29 квітня 2015 р.: тези доп. – К., 2015. – Т.1. – С. 121–122.

Коваленко Ю.Б. Проблема підбору варіантів удосконалення проектованої системи фаззінгу з використанням генетичних алгоритмів. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2015): VIII міжнар. наук.-практ. конф., 18-19 травня 2015р.: тези доп. – К., 2016. – С. 77–80.

Коваленко Ю.Б, Мішина І.Ю. Розробка альтернативної системи захисту інформації на основі існуючого проекту. «Політ. Сучасні проблеми науки: XV міжнар. наук.-практ. конф. молод. учених і студ», 8-9 квітня 2015р.:тези доп– К., 2015. – С. 112.

Коваленко Ю.Б. Методи виявлення уразливостей міжсайтового скриптіngu та SQL-ін'єкції. Матеріали першої всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективні напрямлення захисту інформації». – Одеса, 2016. – С. 39-43.

Коваленко Ю.Б. Міждисциплінарні підходи в процесі дослідження віртуальних спільнот у соціальних мережах. Актуальні питання забезпечення

кібербезпеки та захисту інформації: II міжнар. наук. конф., 24-27 лютого 2018. – тези доп.: – К., 2016. – С. 74-76.

Коваленко Ю.Б. Системний аналіз комбінованого аналізатора бінарного коду bitblaze. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VIII міжнар. Наук.-техн. Конф., 26-29 квітня 2018 р.: тези доп. – Чернігів., 2016. – С. 30.

Коваленко Ю.Б. Структурна схема системи elite keylogger. Приладобудування: стані і перспективи: XVII міжнар. Наук.-техн. Конф., 17-19 травня 2016 р.: тези доп. – К., 2019. – С. 86-87.

Коваленко Ю.Б. Організація безпеки інформаційних ресурсів корпоративних мереж. Міжвідомчий міжрегіональний семінар Наукової Ради НАН України. «Технічні засоби захисту інформації»: тези доп. – К., 22.12.2016р. – С.43.

Kovalenko Yuliia, Kovalchuk Olena. Zero Trust Security: Treats to Information Security in the Context of National Security // International and National Security: Theoretical and Applied Aspects: Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference (Dnipro, March 14, 2025). – Dnipro: Dnipropetrovsk State University of Internal Affairs, 2025. – [P. 41–43].

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 41 науковій праці. Із них 30 статей – опубліковано у наукових журналах, з яких: 25 статті [2–6, 8–10, 12–22, 24–28] – у наукових фахових виданнях України, що включені до переліку, затвердженого МОН України; 5 статей [7, 11, 23, 29, 30] – у виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі даних Scopus. За матеріалами доповідей на науково-технічних та науково-практичних конференціях опубліковано 11 публікацій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел (130 найменувань на 14 сторінках), 2 додатків (на 8 сторінках). Основний текст роботи викладено на 300 сторінках, рисунків – 58, таблиць – 28. Загальний обсяг роботи становить 320 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі представлена загальна характеристика дисертаційної роботи, обґрунтована актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, встановлено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів роботи, публікації, структуру та об'єм дисертації, ключові слова.

У **першому розділі** показані результати аналізу вітчизняної та іноземної літератури за темою дисертаційного дослідження.

Проаналізовані сучасні засоби інформаційної підтримки процесу проектування та експлуатації комплексу бортового обладнання.

Проведено аналіз розвитку структур комплексу бортового обладнання (КБО), показано як проблеми незалежної і федеративної архітектури привели до створення та розвитку концепції інтегрованості модульної авіоніки (ІМА).

Роботи з проектування КБО на основі принципів ІМА ведуться вже більше 20 років, в даний час структура автоматизованого обладнання (АО) всіх КБО ІМА в достатній мірі структурована та являє собою резервованій крейт з набором модулів. Однак, існуючі КБО ІМА не володіють рядом бажаних властивостей: застосуванням тільки уніфікованих модулів, що підтримують багатозадачність експлуатації; апаратного забезпечення (АЗ) та програмного забезпечення (ПЗ); незалежністю ПЗ та АЗ.

Причиною цього є відсутність процесу та налагоджених методів проектування, які враховують повною мірою особливості побудови КБО ІМА. Для процесу проектування КБО на принципах незалежної та федеративної архітектур характерно масштабне застосування принципу успадкування технічних рішень, що дозволяє гарантувати якість створюваного виробу, його відмовобезпечність і зберігати досить високий рівень оптимізації структури комплексу в цілому.

Використання принципів організації КБО попередніх типів при розробці комплексу, створюваного на принципах ІМА, в значній мірі нівелює переваги архітектури ІМА, рівень оптимізації структури КБО ІМА виявляється низьким.

Для досягнення максимальних переваг структури ІМА потрібно мінімізувати використання принципів організації попередніх типів архітектур, для чого необхідно розробити метод проектування, який дозволить оптимізувати структуру КБО ІМА і гарантувати його відповідність вимогам якості та відмовобезпечності.

Для вирішення поставленого завдання запропоновано використовувати концепцію ієрархічної переваги структури функцій над структурами ПЗ і АЗ.

Також, розглянуто основи побудови архітектури перспективних ОС ІМА, наведено порівняльну характеристику принципів побудови архітектури ОС різних виробників, розглянута мережева організація міжмодульного внутрішнього інтерфейсу.

Показано, що прогрес у розвитку ОС авіаційного застосування з початку 2000-х років почав розвиватися в напрямку впровадження в процес проектування ОС концепції ІМА. Для ОС ІМА характерно виокремлення логічних груп фізичних компонентів, які можуть розташуватися як в одному фізичному обчислювальному модулі, так і в декількох. Всі обчислювальні модулі, з'єднані за допомогою високошвидкісних бортових інтерфейсів, є високоінтегрованими пристроями із загальним програмним рівнем управління, типовим для специфікації ARINC 653 APEX.

Показано, що внутрішня організація виробів, що забезпечує властивість реконфігурації обчислювальних структур, заснована на впровадженні наступних мережевих організацій: «лінія», «загальна лінія», «подвійна зірка», комбінаційні схеми на основі «повнозв'язної мережі» та «подвійної зірки». Показано, що найбільш перспективною мережевою організацією для впровадження в ОС ІМА є комбінаційна схема.

Показано, що функціональними елементами ОС ІМА є конструктивно-функціональні модулі (КФМ): модуль обчислювальний (МО); модуль

графічний (МГ); модуль вводу-виводу (МВВ); модуль постійної пам'яті (МПП); модуль-комутатор (МК); модуль напруги (МН).

Показано, що науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи із проектування КФМ для ОС ІМА в даний час ведуться за двома різними напрямками. Перший напрямок передбачає, що структура КФМ складається з набору цифрових програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС), які виконують функціональні завдання ОС. Другий напрямок передбачає реалізацію функціональних завдань ОС процесорним елементами. Основним завданням, для обох напрямків, є задача розробки засобів автоматичного та автоматизованого контролю ОС ІМА і її функціональних елементів.

На основі проведеного аналізу систем контролю та їх алгоритмічного забезпечення, зроблено висновок про необхідність розробки універсального алгоритмічного засобу контролю та діагностики стану сучасних вимірювальних комплексів. Сформульовано постановку задачі дисертаційного дослідження, яка полягає в розробці алгоритмів діагностики та систем контролю авіоніки сучасного ПС в процесі польоту.

Другий розділ присвячений удосконаленню методу і моделі процесу проектування та експлуатації комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки. Для побудови математичних методів підвищення надійності та відмовостійкості на етапі проектування, а також розроблення методів проектування структури функцій КБО ІМА, використано нормативну документацію, що регламентує типовий процес проектування комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки. На цій основі розроблено формалізовану модель процесу, яка враховує вимоги стандартів і забезпечує систематизацію етапів проектування з урахуванням показників надійності та відмовостійкості:

- вихідними даними для проектування структури функцій КБО є перелік узагальнених функцій верхнього рівня і первинні дані про їх структуру, які можуть бути отримані з розділу «Тактико-технічні вимоги» ТЗ, також в даному розділі ТЗ визначено перелік серійних систем, обов'язкових до використання в складі комплексу;

- при проектуванні структури функцій КБО повинні враховуватися дані про рівні гарантії проектування (РГП) функцій, а також вимоги щодо застосування додаткових заходів підвищення відмовобезпечності, представлені в документах «Оцінка функціональних небезпек (FHA)», «Попередня оцінка безпеки (PSSA)» та «Аналіз загальних причин відмов (SCA)»;

- проектування структури функцій комплексу ІМА в типовому процесі розробки повинно проводитися між процесами аналізу технічного завдання і аналізу безпеки та процесом схемотехнічного проектування.

Побудована модель процесу проектування КБО ІМА, що включає процедуру проектування структури функцій представлена на Рис. 1.

Процес проектування – це складний ітераційний процес послідовного характеру, який тісно пов'язаний з процесом оцінки безпеки. Весь процес

розділений на етапи і рівні. Етапи проектування зазначені в методі загальними формулюваннями і не суперечать ДСТУ ISO/IEC/IEEE 15288:2016. У моделі поділ на рівні передбачає розмежування процесів проектування ПС КБО, систем і модулів один від одного і визначає механізми взаємозв'язків між ними. Між рівнями проектування існують жорсткі ієрархічні зв'язки.

Етапи	Етап 1	Етап 2	Етап 3	Етап 4	Етап 5	Етап 6	Етап 7
Розробка	Аналіз	Розробка та оцінка концепцій	Ескізне проектування	Технічне проектування	Перша поставка	Перший успіх	Сертифікація
Розробка об'єднання		Аналіз поставленої задачі (PR)	- Аналіз вимог до АН (PRR) - Визначення вимог до АН - Попереднє проектування (PDR)	Технічне проектування (CDR)	- Реалізація (TRR) - Випробування	Валідація АН (FFR)	Сертифікація АН (CR)
Розробка КБО/Систем	Аналіз задачі (MDR)	Розробка концепцій КБО/систем (PRR)	- Розробка вимог (SRR) - Попереднє проектування (PDR)	Детальне проектування (CDR)	- Моделювання - Інтеграція та випробування (TRR) - Верифікація системи (QR) - Інтеграція і верифікація першого льотного зразка КБО (AR)	Валідація КБО (FFR)	Сертифікація систем та компонентів КБО (CR)
Розробка програмного забезпечення		Аналіз поставленої задачі (PR)	- Аналіз вимог до ПЗ (PRR) - Розробка вимог високого рівня до ПЗ (ADR)	Розробка вимог низького рівня до ПЗ (архітектура) (DDR)	- Кодування (TRR) - Інтеграція ПЗ і верифікація	Валідація ПЗ (FFR)	Сертифікація ПЗ (CR)
AR – Acceptance ADR – Architecture Design Review CDR – Critical Design Review CR – Certification Review DDR – Detail Design Review FFR – First Flight Review MDR – Mission Definition Review PDR – Preliminary Design Review PR – Planning Review PRR – Preliminary Requirements Review SRR – System Requirements Review QR – Qualification Review TRR – Test Readiness Review							

Рис.1. Метод підтримки поетапного процесу технічної розробки КБО

Це забезпечує єдність концепцій проектування модулів у рамках системи, систем у рамках КБО тощо. Зв'язки між рівнями відображені в документації, яка містить вимоги. Вимоги до будь-якої складової частини виробу формуються поєднанням вимог верхнього рівня та приватних вимог.

У підході ІМА функції бортового комплексу виділяються в логічні розділи, які можуть розташовуватися як в одному фізичному обчислювальному пристрої, так і в декількох.

Всі обчислювальні пристрої, з'єднані за допомогою високошвидкісних бортових інтерфейсів, є високоінтегрованими пристроями із загальним програмним рівнем, типовим для специфікації ARINC 653 APEX.

Основними принципами побудови інтегрованих обчислювальних систем є:

- модульна, відкрита, мікропроцесорно-незалежна архітектура БРЕО, що дозволяє нарощувати обчислювальні ресурси, поєднувати вироби різних виробників, виконаних в єдиному стандартному конструктивному виконанні;
- розподілена обробка сигналів і даних на основі багатопроцесорних обчислювальних засобів в розподіленій архітектурі обчислювальних систем, використання розподіленої мультизадачної ОС реального часу;
- використання високошвидкісних інформаційних каналів і інтерфейсів для міжсистемного, міжмодульного і внутрімодульного інформаційного обміну;
- використання технології розробки ПЗ з використанням сертифікованих мов програмування високого рівня;
- використання модулів, вузлів в якості конструктивно-змінних одиниць авіоніки, за рахунок чого підвищуються експлуатаційні властивості обчислювальної системи.

Основні причини створення нових цифрових обчислювальних систем обумовлені бажанням розробників надати апаратурі нові експлуатаційні властивості за рахунок:

- підвищення вимог до часу реакції виконавчих елементів авіоніки, координації дій льотного складу та елементів авіоніки, точності обчислення параметрів руху повітряних суден;
- підвищення вимоги до інтелектуалізації ПЗ комплексів повітряних суден;
- підвищення вимог до безпеки, регулярності та ефективності виконання польотів;
- підвищення вимог надійності апаратури обчислювальних комплексів повітряних суден;
- зниження вартості та оперативності технічного обслуговування в період експлуатації, а також відсутність необхідності технічного обслуговування в міжсервісні періоди.

Для порівняння продуктивності інтегрованої модульної авіоніки з попередніми системами використовуємо показники: надійність, швидкодія, масо-габаритні характеристики, вартість і можливості.

1. Надійність: порівнюємо MTBF та MTTF ІМА з попередніми системами. Вищі значення вказують на покращення надійності.

2. Швидкодія: порівняти швидкість обробки та реакції нової системи з попередніми. ІМА пропонує швидші обчислення або реакцію – це є позитивним показником продуктивності.

3. Масо-габаритні характеристики: ІМА має менші розміри або вагу порівняно з попередніми системами – це є плюсом для продуктивності в авіаційній галузі.

4. Вартість: порівняти вартість впровадження та експлуатації ІМА з попередніми системами. Нова система виявляється більш вигідною з економічної точки зору, що є перевагою для продуктивності.

5. Можливості оцінити нові можливості, які надає ІМА порівняно з попередніми системами, наприклад, покращена інтеграція, більша масштабованість або підтримка нових стандартів.

Ці показники можна порівняти для оцінки того, наскільки ефективною є нова інтегрована модульна авіоніка порівняно з попередніми системами.

Визначили, що до складу інформаційної підтримки входить множина таких засобів як методи, моделі, критерії, системи, алгоритмічне, програмне та апаратне забезпечення, що використовуються для проектування та експлуатації КБО ІМА.

Засоби інформаційної підтримки процесів проектування та експлуатації: методичні засоби – документи, що характеризують склад, правила відбору та експлуатації засобів автоматизованого проектування та експлуатації;

лінгвістичні засоби – сукупність мов, які застосовуються для опису процедур автоматизованого проектування та проектних рішень в експлуатації;

математичні засоби – математичні моделі проєктованих об'єктів, методи та алгоритми проєктних процедур, що використовуються при автоматизованому проєктуванні та експлуатації;

програмні засоби – об'єднують власне програми для систем обробки даних на машинних носіях та програмну документацію, необхідну для проєктування та експлуатації;

інформаційні засоби – поєднують всі можливі дані, необхідні для виконання автоматизованого проєктування та експлуатації;

організаційні засоби – включають положення, інструкції, накази, штатні розписи, кваліфікаційні вимоги та інші документи, що регламентують організаційну структуру підрозділів проєктної організації та їхню взаємодію з комплексом засобів автоматизованого проєктування та експлуатації.

Для порівняння продуктивності ІМА з попередніми системами використаємо наступні кроки:

1. Визначення базового рівня: обрали одну з попередніх систем як базовий рівень продуктивності і встановили його як 100%.

2. Визначення покращень: наскільки кращою є ІМА порівняно з базовим рівнем для кожного показника (надійність, швидкодія, масо-габаритні характеристики, вартість і можливості).

3. Візуалізація отриманих результати для кожного показника представлена в Таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз характеристик ІМА та попередніх систем авіоніки

Показник	Попередня Система	ІМА	% покращення
Надійність	90%	95%	5.56%
Швидкодія	1000 операцій/с	1200 операцій/с	20%
Масо-габаритні характеристики	100 кг, 1 м3	90 кг, 0.8 м3	10%
Вартість	\$1,000,000	\$900,000	10%
Перспективи	Немає	Розширені	

Отже, для побудови перспективних бортових цифрових обчислювальних систем слід керуватися концепцією інтегрованої модульної авіоніки; для побудови модулів ІМА необхідно визначити номенклатуру обчислювальних модулів, а також схеми зв'язку і види використаних інтерфейсів; для розробки обчислювальних модулів ІМА потрібна розробка схем перевірок і програмного забезпечення, спеціалізованих під виробу класу ІМА, як в процесі експлуатації повітряного судна, так і в процесі проєктування і виробництва на заводі-виробнику; уніфікація модулів ІМА дозволить побудувати автоматизоване робоче місце по перевірці виробів, що володіють підвищеними показниками уніфікації та стандартизації проєктних рішень.

Зауважимо, що в основі розробки КБО лежить принцип системного підходу і цільового управління. Використання цього принципу вимагає чіткого уявлення про призначення і умови розробки та використання системи, а також формування критерію, що дозволяє оцінити ступінь досягнення цієї мети КБО, що розробляється. Цей критерій повинен враховувати як зовнішні

умови, в яких буде функціонувати система, так і будь-якого роду обмеження, які будуть мати місце при розробці, виготовленні та експлуатації КБО. Оскільки ці обмеження або, принаймні, частина з них нежорсткі і їх в тій чи іншій мірі можна подолати, тільки вклавши в КБО великі кошти, найбільш загальним, глобальним критерієм якості системи є вираз, що оцінює, з одного боку, її ефективність, а з іншого боку вартість.

Одночасна максимізація ефективності та мінімізація вартості системи, як правило, є неможливою. Тому використання багатокomпонентних (векторних) критеріїв, на відміну від однокомпонентних (скалярних), супроводжується додатковими труднощами. У більшості випадків ці труднощі долають шляхом фіксації значення одного з компонентів, наприклад вартості, у вигляді обмеження та оптимізації іншого критерію. Інший підхід полягає у заданні вагових коефіцієнтів для кожного з компонентів і подальшій оптимізації їх зваженої суми.

У третьому розділі розроблено математичне й алгоритмічне забезпечення інформаційного процесу автоматизованого проектування комплексу бортового обладнання інтегральної модульної авіоніки для підвищення достовірності контролю обчислювальної системи інтегрованої модульної авіоніки.

Розробили модель процесу проектування комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки для побудови математичних методів підвищення надійності та відмовостійкості на етапі проектування. Запропоновано підхід до проектування додатків з використанням модельно-орієнтованого проектування в Simulink та їх перенесення на ARINC 653-сумісну виконавчу платформу на основі XtratuM. Цей підхід базується на правильному відображенні абстракцій Simulink на абстракції та сутності ARINC 653, що дозволяє досягти інтеграції різних компонентів і платформ.

Для розробки критично важливих систем авіоніки необхідно забезпечити мінімальну можливість помилки, для найвищого рівня в авіоніці встановлена ймовірність відмови, а також мінімізувати витрати на розробку і виправлення коду. З огляду на складність системи та її взаємозв'язок із багатофункціональними апаратними комплексами, було розроблено структурну модель інформаційної підтримки процесу проектування та експлуатації складних автоматизованих систем управління комплексом бортового обладнання. Ця модель стала основою для створення відповідного програмного забезпечення.

Модель забезпечує синхронізацію всіх учасників проекту на кожній ітерації, а також дає змогу використовувати напрацьовані дані та перевірену методологію. На початковому етапі будь-якого проекту модель може бути адаптована до його специфіки, незалежно від типу організації чи характеру проекту. Це дозволяє структурувати розробку на окремі компоненти, кожен з яких включає визначений перелік дій, інструкцій, рекомендацій та пояснень щодо реалізації. Такий підхід є особливо ефективним у контексті багатоітераційного циклу розробки та тестування програмного забезпечення авіоніки, оскільки дає змогу розділити процес створення ПЗ на окремі керовані

підцикли. У результаті це створює підґрунтя для формування моделі інформаційної системи підтримки процесів проектування та експлуатації бортового обладнання.

Отже, інформаційна система дозволяє оцінити ризики на кожному етапі розробки. Крім того, так само оптимально розподіляє зайнятість фахівців в умовах дефіциту ресурсів і часу на короткі проміжки часу. Сучасні рішення для контролю і моніторингу систем експлуатації повітряних суден (Flight Control System) є складним програмно-апаратним комплексом, роботу якого в цілому не знає жоден зі співробітників та розробників.

Для контролю кожного етапу і для подальшої можливості сертифікації процес розбитий на різні рівні, кожному з яких відповідає свій документ, для якого створюється беклог, який контролює його. В результаті кожен етап розробки, всі помилки і виправлення класифікуються та документуються. Повторюючи кожен раз ітерації розробки ймовірність помилки знижується. Дані документи так само створюються на основі внутрішніх стандартів компанії-розробника і вимог, що пред'явлених замовником. Оскільки, замовник ПЗ знаходиться на вершині процесу, тому першим етапом є аналіз вимог замовника та визначення базової функціональності системи, на основі якої створюється загальна концепція і схема ПЗ, включаючи технічні подробиці використовуваного обладнання. Тобто створення первинних специфікацій системи (Equipment Specification) та вимог (System Requirements).

Ймовірність безвідмовної роботи представимо як ймовірність безвідмовної роботи авіоніки для випадку ковзного резервування з навантаженим резервом. Дійсно, по-перше, будь-який інформаційний тракт арифметико-логічного пристрою (АЛП), що відмовив за основою $m_i (i = \overline{1, n})$ може бути замінений на будь-який справний контрольний тракт за основою $m_j (j = \overline{n+1, n-k})$; $m_i < m_j$, де n та k – відповідно кількість інформаційних та контрольних основ МА; по-друге, всі тракти модулів, як інформаційні, і контрольні, одночасно, незалежно й однаково беруть участь у обробці інформації.

У цьому випадку формула для визначення ймовірності безвідмовної роботи набуде вигляду:

$$P_{MA}^{(k)}(t) = \sum_{i=0}^k C_{k+n}^i P_1^{k+n-i}(t) \sum_{j=0}^i (-1)^j C_i^j P_1^j(t), \quad (1)$$

де $P_1(t) = e^{-\lambda_1 t}$ – ймовірність безвідмовної роботи з найбільшою (з найменш надійною) основою m_{n+k} ; λ_1 – інтенсивність відмов обладнання з найбільшою основою m_{n+k} .

Співвідношення (1) може бути використане для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи при наступних припущеннях:

- відмови трактів підпорядковані експоненційному розподілу;

- комутуючий пристрій ідеальний (тобто ймовірність безвідмовності роботи комутатора дорівнює одиниці);
- інформаційні та контрольні тракти обробки інформації рівнонадійні, тобто ймовірність безвідмовної роботи всіх трактів приймається рівною ймовірності безвідмовної роботи $P_1(t)$ тракту з найбільшою основою m_{n+k} , що має найменшу ймовірність безвідмовної роботи;
- не враховується можливість відновлення трактів, що відмовили.

Зазначимо, що реальна надійність буде вищою, ніж та, що визначається співвідношенням (1), оскільки дана формула не враховує можливість заміни одним контрольним трактом по основі m_j одного або одночасно кількох

непрацездатних інформаційних трактів за умови $m_j \geq \prod_{i=1}^q m_{k_i}$, де q – максимальна кількість робочих трактів, що одночасно замінюються, одним контрольним працездатним трактом за основою m_j . Позначимо через λ_1 інтенсивність відмов обладнання, що віднесена до одного двійкового розряду. У цьому випадку ймовірність безвідмовної роботи обладнання відносно до одного двійкового розряду дорівнює $P_1(t) = e^{-\lambda_1 t}$.

Для позиційного 1 – байтового ймовірність безвідмовної роботи дорівнює $P_0(t) = e^{-\lambda_0 t}$, де $\lambda_0 = 8l\lambda_1$.

Отже, ймовірність безвідмовної роботи для тройованої мажорної структури, що містить три модулі та ідеальний мажоритарний елемент, дорівнює:

$$P_{MA}(t) = 3P_0^2(t) - 2P_0^3(t) = e^{-16\lambda_1 t} (3 - 2e^{-8\lambda_1 t}) \quad (2)$$

Ймовірність безвідмовної роботи з довільної основи $m_i (i = \overline{1, n+k})$ визначається, як $P_i(t) = e^{-\lambda_1 t}$ або $P_i(t) = e^{-\lambda_1 a_{n+k} t}$, де $a_{n+k} = [\log_2(m_{n+k} - 1)] + 1$.

Ймовірність безвідмовної роботи визначається відповідно до виразу (2).

Нехай $l=1$ (однобайтовий) та $k=1$. Тоді з урахуванням критерію мінімальності апаратної надмірності можна подати у вигляді набору наступних основ (модулів) $m_1 = 3, m_2 = 4, m_3 = 5, m_4 = 7, m_5 = 11$.

$$P_{MA}^{(1)}(t) = 5P_1^4(t) - 4P_1^5(t) = e^{-16\lambda_1 t} (5 - 4e^{-4\lambda_1 t}) \quad (3)$$

Позначимо $\lambda^* = 8\lambda_1$. При цьому вирази (2) та (3) можна записати у вигляді:

$$P_{MA}(t) = e^{-2\lambda^* t} (3 - 2e^{-\lambda^* t}) \quad (4)$$

$$P_{MA}^{(1)}(t) = e^{-2\lambda^* t} (5 - 4e^{-0,5\lambda^* t}) \quad (5)$$

Деякий згенерований Simulink код потрібно налаштувати до цільового розділу. Це включає створення портів вибірки, читання та запис, створення

деяких допоміжних файлів з визначеннями констант визначеннями констант, спосіб використання POSIX-потоків та семафорів використання потоків і семафорів POSIX. Досягти цього можна за допомогою компілятора цільової мови для налаштування згенерованого коду. Це є потужним інструментом, коли мова йде про розробку проекту для ІМА.

Проводиться повний тест оперативного запам'ятовуючого пристрою, тестується постійний запам'ятовуючий пристрій шляхом підрахунку і порівняння контрольних сум і пристроїв введення-виведення. Результат про проходження тесту відображається в модулі попередньої перевірки (МПП), де записується в журнал. У разі невдалого проходження тесту здійснюється реконфігурація системи за умови наявності доступних апаратних ресурсів. Якщо ресурси відсутні, формується сигнал несправності, і бортова цифрова обчислювальна система (БЦОС) вважається такою, що вийшла з ладу. При успішному проходженні тесту встановлюється сигнал справності та з МПП починається завантаження функціонального програмного забезпечення для кожного функціонального модуля в системі.

Після виконання кожного циклу функціональне програмне забезпечення (ФПЗ) проводить тестовий контроль в фоновому режимі. Режим виконання тесту визначається разовою командою «автоматизований контроль». При її наявності тест проводиться в розширеному режимі, при відсутності – в стандартному режимі.

У розширеному тестовому режимі реалізували механізм автоматизованої перевірки модулів системи. Інформація з кожного модуля заноситься до незалежного постійного запам'ятовуючого пристрою (ПЗП), після чого виконується повний комплекс тестувань. Провели повну перевірку оперативного запам'ятовуючого пристрою (ОЗП), тестування ПЗП з обчисленням і верифікацією контрольних сум, діагностику центрального процесора (ЦП), перевірку системи переривань, а також тестування пристроїв введення-виведення (ПВВ) на предмет збоїв і коректності обміну даними.

Після завершення тестування в обох режимах інформацію про результати було передано до модуля попередньої підготовки (МПП), де вона була зареєстрована в електронному журналі. У разі успішного завершення тесту формується сигнал справності, після чого бортова централізована операційна система (БЦОС) переходить до виконання наступного циклу функціонального програмного забезпечення.

У випадку виявлення помилок або збоїв ініціюється процедура реконфігурації системи з урахуванням наявних апаратних ресурсів, що дозволяє зберегти працездатність і стабільність функціонування в умовах часткової відмови.

Реконфігурація при призначенні кількох завдань на функціональний модуль можлива не тільки при наявності резервного модуля, а також якщо у працюючих модулів є додаткові ресурси для виконання завдань, які виконував модуль, що відмовив. В такому випадку, завдання модуля, який відмовив розподіляються між працюючими модулями. Реконфігурація при призначенні завдань, коли один модуль виконує одну задачу, а три інших модулів

виконують по декілька завдань, залежить від того, який з модулів відмовив. Якщо відмовив той модуль, який виконував одну задачу, то реконфігурація можливо тільки при наявності резервних модулів. Якщо відмовив той модуль, який виконував кілька завдань, то реконфігурація також можлива при наявності додаткових ресурсів на останніх двох модулях, що виконують кілька завдань. В такому випадку, ці два модуля починають виконувати завдання модуля, що відмовив.

У четвертому розділі були вирішені такі задачі: розробка системи підвищення відмовостійкості БРЕО на основі теорії функціональних систем; виконано синтез та аналіз евристичної процедури виявлення погіршення технічного стану на основі оцінювання параметрів моделі змін показників надійності; виконано синтез та аналіз евристичної процедури виявлення погіршення технічного стану на основі апроксимації емпіричних даних для стрибкоподібної моделі; виконано синтез та аналіз послідовної процедури виявлення погіршення технічного стану; отримано оцінки параметрів погіршення технічного стану на основі методу максимальної правдоподібності для стрибкоподібної, лінійної та квадратичної моделей.

Для прогнозування кількості відмов під час експлуатації досліджено три підходи. Перший ґрунтується на застосуванні закону Пуассона для оцінювання відмов відновлюваних елементів за середнім значенням інтенсивності потоку відмов, визначеним на основі сумарного напрацювання за контрольний період. Другий орієнтований на невідновлювані вироби та передбачає використання характеристик інтенсивності відмов і розрахунок імовірності безвідмовної роботи за прогнозований період. Третій підхід передбачає екстраполяцію функції розподілу поступових відмов. Для оцінювання відповідності статистичних даних щодо напрацювання контрольованих елементів застосовується перевірка гіпотези про відповідність двопараметричному закону Вейбулла.

$$S = \left\{ \frac{\sum_{n=\frac{r}{2}-1}^{r-1} \frac{t_{n+1}-t_n}{M_n}}{\sum_{n=1}^{r-1} \frac{t_{n+1}-t_n}{M_n}} \right\} < S_k, \quad (6)$$

де r – умарна кількість поступових відмов елемента модулів бортового радіоелектронного обладнання (БРЕО), зареєстрованих на момент контролю;; M_n, S_k – величини, значення яких визначаються за відповідною табличною залежністю.

При виконанні нерівності (6) гіпотеза про застосування розподілу Вейбулла не відкидається при 95%-му рівні значимості.

Послідовно для обумовленого напрацювання елемента t_i ; відомий значенням інтенсивності відмов, що визначаються з виразу (6) який вираховує статистичні оцінки ймовірностей безвідмовної роботи

$$P(t_i) = \exp \left\{ - \sum_{j=1}^i \frac{\lambda(t_j) + \lambda(t_{j-1})}{2} - (t_j - t_{j-1}) \right\}, \quad (7)$$

де слідує приймати $\lambda(t_0) = 0$.

Приймаючи для апроксимації розподілу поступових відмов двопараметричний закон Вейбулла, методом найменших квадратів

обчислюються параметри цього закону b і θ за співвідношенням:

$$b = \frac{(\sum_{j=1}^m X_j)^2 - m \sum_{j=1}^m X_j^2}{m \sum_{j=1}^m X_j Y_j - \sum_{j=1}^m X_j \sum_{j=1}^m Y_j}, \quad (8)$$

$$\ln \theta = \frac{1}{m} \left(\sum_{j=1}^m Y_j - \frac{1}{b} \sum_{j=1}^m X_j \right), \quad (9)$$

де $X_j = \ln\{\ln[1/P(t_j)]\}$, $Y = \ln t_j$; m – число вибраних інтервалів напрацювання на момент контролю рівня надійності. Значення коефіцієнтів M_n і S_{kr} наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів M_n і S_{kr} із значення коефіцієнта α розрахункових параметрів M_n та ρ що змінюються залежно від висоти h .

n/r	h					
	3	4	5	6	7	8
1	1.2	1.15	1.11	1.09	1.07	1.06
2	0.8	0.70	0.64	0.61	0.59	0.57
3		0.67	0.53	0.47	0.44	0.42
4			0.58	0.44	0.38	0.35
5				0.52	0.38	0.33
6					0.48	0.34
7						0.44
S_k	0.9	0.76	0.86	0.73	0.8	0.71

h	ρ					
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.05	0.53	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07
0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16
0.20	0.24	0.27	0.29	0.31	0.32	0.34
0.30	0.40	0.44	0.47	0.50	0.53	0.55
0.40	0.59	0.64	0.63	0.73	0.76	0.80
0.50	0.83	0.90	0.95	1.00	1.05	1.13

Для прогнозованого інтервалу напрацювання елемента $\Delta t_w = t_w - t_k$ визначається ймовірність його безвідмовної роботи за формулою:

$$P_w = \exp(-\lambda_b \Delta \bar{t}_w) \exp\left(-\left(\frac{t_w - t_k}{\theta}\right)\right) \quad (10)$$

Число запасних елементів на період прогнозу знаходиться з виразу (9). При невиконанні нерівності (6) перевіряється гіпотеза на можливість застосування нормального розподілу.

Отже, спочатку визначаються параметри нормального закону: середнього відпрацювання на відмову $\tilde{T}$ і дисперсії σ за формулами:

$$\tilde{T} = \tilde{T}_1 - \alpha(\tilde{T}_1 - R) \quad (11)$$

$$\tilde{T}_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_j; \quad \sigma_1^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (t_j - \tilde{T}_1)^2, \quad (12)$$

$$\text{де } \sigma^2 = \sigma_1^2 + \alpha(\tilde{T}_1 - R^2)$$

Під час експлуатації модулі можуть переходити з робочого стану S_1 до стану відмови S_2 , що призводить до надзвичайної ситуації зі зниженням довговічності обладнання, а також до стану відмови S_3 , який може бути усунений під час експлуатації. Відповідно до принципу зворотного зв'язку між виробництвом та експлуатацією, після дострокового зняття модулів вони піддаються необхідним доробкам для повернення до робочого стану ($S_2 \rightarrow S_1$). Ефективна діагностика технічного стану модулів під час експлуатації дозволяє перенести частину відмов з категорії зі скороченням довговічності обладнання до категорії з можливістю усунення в процесі

експлуатації($S_2 \rightarrow S_3$).

Якщо припустити, що перехід модулів з одного стану в інший відбувається незалежно від попереднього кроку і у випадкові моменти часу, то вищезгаданий процес можна визначити як марківський процес з безперервним часом і дискретними станами.

Граф стану такого процесу зображений на Рис. 2., де символами f_{ij} позначені щільності ймовірностей відповідних переходів: f_{12} щільність ймовірності переходу з працездатного стану до стану зі скороченням довговічності обладнання ($S_1 \rightarrow S_2$)).

$$\begin{aligned} f_{21} - F_x S_2 \rightarrow S_1; & \quad f_{13} - F_x S_1 \rightarrow S_3; \\ f_{31} - F_x S_3 \rightarrow S_1; & \quad f_{23} - F_x S_2 \rightarrow S_3; \end{aligned}$$

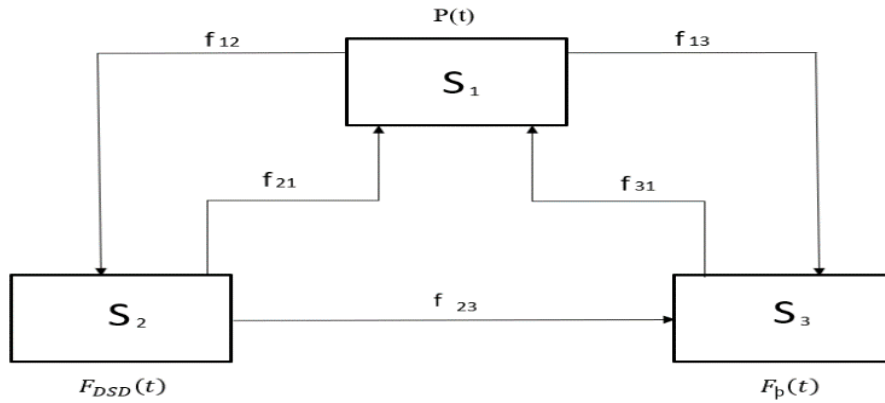


Рис. 2. Граф станів експлуатації БРЕО.

Зазначені F_x можна знайти за статистичними даними, зареєстрованими протягом контрольного періоду експлуатації модулів.

Для графа, наведеного на Рис. 2. S_1, S_2 і S_3 ймовірності станів мають наступний сенс: $P(t)$ ймовірність безвідмовної роботи модулів; $F_D(t)$ та $F_p(t)$ ймовірність відмов відповідних категорій.

Дані ймовірності повинні задовольняти систему диференціальних рівнянь Колмогорова:

$$\begin{cases} \frac{dP(t)}{dt} = -(f_{12} + f_{13})P(t) + f_{21}F_D(t) + f_{31}F_p(t) \\ \frac{dF_D(t)}{dt} = f_{12}P(t) - (f_{21} + f_{23})F_D(t) \\ \frac{dF_p(t)}{dt} = f_{13}P(t) + f_{23}F_D(t) - f_{31}F_p(t) \end{cases} \quad (13)$$

Будь-яке з трьох рівнянь системи можна замінити умовою нормування ймовірностей: $P(t) + F_D(t) + F_p(t) = 1$, оскільки стани S_1, S_2, S_3 утворюють повну групу подій.

Початкові умови для системи рівнянь слід задавати на основі аналізу вихідного стану БРЕО, який за $t = 0$ можна охарактеризувати рівняннями $P(0)=1, F_D(0) = F_p(0) = 0$. Інтегрування системи за умови вказівки на початкових умовах дасть змогу визначити ймовірності станів як функції часу, які необхідні для аналізу ефективності заходів, спрямованих на зменшення

числа достроково знятих модулів за рахунок їх доопрацювання і переведення відмов із категорії D у розряд β .

Розрахунок показників ефективності процесу технічної експлуатації повітряних суден (ПС) здійснюється на кожному організаційному рівні структури авіаційно-технічної бази (АТБ). Для цього використовуються дані за звітний період, отримані із системи оперативного управління процесом використання парку літальних апаратів, а також відомості з обліково-звітної документації АТБ та авіаційно-ремонтних заводів (АРЗ).

Частота попередньо визначається через обчислення таких проміжних величин, як імовірність потрапляння у i - тий стан процесу технічної експлуатації на r -му організаційному рівні.

$$\pi_1 = \frac{n_i^{(r)}}{\sum_{k=1}^{N_r} n_k^{(r)}} , \quad (14),$$

де $n_i^{(r)}$ і $n_k^{(r)}$ – число потраплянь у i -ті, k -ті стани процесу технічної експлуатації на r -му рівні; N_r – число станів процесу технічної експлуатації r -го рівня;

середній час перебування ПС в i -му стані процесу технічної експлуатації.

$$\mu_i = t_i / n_i , \quad (15),$$

де t_i - сумарний час перебування в i -ом стані процесу технічної експлуатації; середні трудовитрати в i -му стані процесу технічної експлуатації

$$\tilde{t}_i = t_i / n_i , \quad (16)$$

де t_i - сумарні трудовитрати в i -му стані; середні витрати коштів у станах процесу технічної експлуатації

$$\tilde{C}_i = C_i / n_i , \quad (17)$$

де C_i - сумарні витрати коштів на технічне обслуговування (ремонт) в i -му стані процесу технічної експлуатації; середнє число відмов і несправностей (загальне), виявлених в i -му стані процесу технічної експлуатації з j -ї причини

$$\tilde{d}_{ij} = d_{ij} / n_i , \quad (18)$$

де $\tilde{d}_{ij}$ - число відмов і несправностей, виявлених у i -му стані з j -ї причини; середнє число відмов і несправностей (загальне), виявлених у i -му стані процесу технічної експлуатації

$$\tilde{d}_i = d_i / n_i , \quad (19)$$

де d_i - число відмов і несправностей у i -му стані; середнє число затримок відправлень у i -му стані з j -ї причини

$$\tilde{m}_{ij} = m_{ij} / n_i , \quad (20)$$

де m_{ij} - число затримок в i -м стані з j причини.

Розрахунок показників ефективності процесу технічної експлуатації на r -му рівні ($r=1,2,3$) проводиться таким чином:

напрацювання на відмову і несправність, виявлені в i -му стані з j -ї причини,

$$T_{ij}^{(r)} = \frac{\pi_1^{(r)} \mu_{1P}}{\sum_{i=1}^{N_r} \pi_1^{(r)} \tilde{d}_{ij}} , \quad (21)$$

де π_1 - частота призначення в рейс; μ_{1P} - середній наліт у рейсі; напрацювання на відмову і несправність, виявлені в i -му стані

$$T_i^{(r)} = \frac{\pi_1^{(r)} \mu_{1P}}{\sum_{i=1}^{N_r} \pi_1^{(r)} \bar{d}_i} \quad (22)$$

коефіцієнт регулярності вильотів з урахуванням затримок у i -му стані з j -ї причини

$$P_{ij}^{(r)} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_k} m_{ij}}{n_i} \quad (23)$$

коефіцієнт використання ПС де N_k – число станів затримок;

$$K_U^{(r)} = \frac{\pi_1^{(r)} \mu_{1П}}{\sum_{i=1}^{N_r} \pi_i \mu_i} \quad (24)$$

коефіцієнт можливого використання ПС (коефіцієнт погодинної справності)

$$K_B^{(r)} = \frac{\pi_1^{(r)} \mu_1 \sum_{j=1}^{N_r} \pi_j^{(r)} \mu_i}{\sum_{i=1}^{N_r} \pi_j^{(r)} \mu_1} \quad (25)$$

де π_i – частота потрапляння в стани: резерву (Г), невикористання справного повітряного судна (А) та простоїв через метеоумови (М) на r -му рівні;

μ_j – середній час перебування у відповідних станах: Г, А, М.

Питомі простої у станах технічного обслуговування та ремонту

$$K_P^{(r)} = \frac{\sum_{k=1}^{N_r} \pi_k^{(r)} \mu_k}{\pi_1^{(r)} \mu_{1P}} \quad (26)$$

Питома трудоемність технічного обслуговування та ремонту

$$\tau_Y^{(r)} = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} \pi_i \tau_i}{\pi_1^{(r)} \mu_{1P}} \quad (27)$$

Питома вартість технічного обслуговування та ремонту

$$C_Y^{(r)} = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} \pi_i C_i}{\pi_1^{(r)} \mu_{1P}} \quad (28)$$

Розробка ефективних заходів щодо запобігання відмовам є трудомістким та нетривіальним завданням, що вимагає залучення фахівців відповідного профілю, мобілізації їхнього професійного досвіду. Вирішення цих завдань не завжди піддається математичній формалізації і вимагає застосування методів експертної оцінки. З цією метою у державних органах управління необхідно мати автоматизовану систему експертної оцінки заходів. У рамках такої системи вирішуються завдання прийняття рішень за наявності альтернативних проектів на основі думки групи експертів. Така система розроблена в рамках реалізації автоматизованої системи наукових досліджень і вирішує наступні завдання: збір даних про заходи щодо підтримки заданого рівня надійності АТ в експлуатації; формування БД експертів; обробку та аналіз експертних карток.

Комплексні оцінки будуються з урахуванням розглянутих вище оцінок. Процедура комплексного аналізу аналогічна методиці отримання ранжированих оцінок, тільки замість оцінок експертів використовуються оцінки, отримані різними методами. Коефіцієнт конкордації тут застосовується з метою оцінки ступеня узгодженості різних методів. Крім того, коефіцієнт конкордації можна використовувати для оцінки ступеня узгодженості думок експерта при використанні декількох методів одночасно.

У п'ятому розділі проведено експериментальні дослідження та отримано результати моделювання роботи елементів і пристроїв обчислювальної системи інтегральної модульної авіоніки.

За допомогою методів оцінки і прогнозування інструментальних похибок бортового обладнання визначено, що обурення викликаючи кутову швидкість догляду Ω інформаційної підтримки бортового обладнання, яку можна розділити на швидкість підтримки Ω_n , не залежну від прискорення, і швидкість підтримки Ω_p , яка залежить від прискорення і пропорційна розбалансуванню. Ω_p складається з швидкості догляду Ω_{pI} і Ω_{pII} , пропорційні осьової і радіальної розбалансуванню відповідно. Найбільший вплив на стан інформаційної підтримки бортового обладнання надає складова Ω_{pI} .

Тому для оцінки та прогнозування інструментальних похибок БО, що застосовуються в ПС, можна використовувати, наприклад, оцінку і прогнозування працездатності БО, яка залежить від швидкості підтримки Ω_{pI} .

Даний метод полягає в визначенні швидкості догляду Ω_{pI} за інформацією, яка вимірювалася в попередніх випробуваннях і по вимірах при запуску бортового обладнання для введення поправок. Далі проводиться прогноз величини стабільної складової Ω_{pI} – «стрибка». Прогноз дається на наступний запуск бортового обладнання приладів і обчислюється оцінка відповідності його допуску.

На інтервалі польоту проводиться визначення та прогноз чітких характеристик інформаційної підтримки бортового обладнання. Розрахунок змінної складової Ω_{pI} проводиться в заданому допуску. Останні два пункти дозволяють прийняти рішення про можливість установки БРЕО на борт ПС.

У практичних додатках проводиться рішення задачі оцінки і прогнозу інструментальних похибок інформаційної підтримки бортового обладнання, паралельно: визначається стабільна складова швидкості догляду Ω_{pI} при запуску, яка використовується в алгоритмах управління для формування поправок; обчислюється оцінка та прогноз характеристик БРЕО на інтервалі польоту ПС.

Модель швидкості підтримки інформаційної підтримки бортового обладнання Ω_{pI} має вигляд моделі:

$$\Omega_{M_t} = \overset{3}{\ell}(\Omega_t^3) + \alpha_{\Delta}(\Delta\Omega_t^3) + \overset{c}{\ell}(\Omega_t^c). \quad (29)$$

Введення поправок зазвичай здійснюється на Ω_3 , тому $\Omega_{M_t} = \overset{3}{\ell}(\Omega_t^3)$, якість здійснення корекції за допомогою стабільної складової швидкості характеризується ступенем наближення розрахункової швидкості прямування її до фактичного значення, тобто:

$$|\Omega_t^3 - \Omega_{M_t}| \leq \varepsilon_{\Omega}, \text{ при } t_{\text{вим}} \leq t_{\text{доп}} \quad (30)$$

Важливою характеристикою при оцінці параметрів моделі є їх стабільність в сенсі наступних критеріїв, де $M[\overset{3}{\ell}]$ – математичне очікування; Δ , η_{ℓ} , ε_{ℓ} – задані точності визначення параметрів моделі.

Ці параметри визначають виходячи з умови забезпечення мінімального впливу інструментальних похибок БО на точність переміщення ПС в задану область фазового простору; $i = 1, 2, \dots, n$ – послідовність оцінок параметрів моделі.

$$K_I = |M[\ell^3] - \ell_i^3| \leq \Delta, \quad K_{II} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ell_i^3 - M[\ell_i^3])^2}{n-1}} - M \leq \eta_\ell, \quad (31)$$

$$K_{III} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ell_i^3 - \ell_{i-1}^3)^2}{n}} \leq \varepsilon_\ell,$$

критерій K_{III} є чутливий до зміни параметрів моделі (29), яка використовується для оцінки та прогнозу працездатності інформаційної підтримки бортового обладнання. Процес зміни «стрибка» характеризує член $\Omega_{M_t} = \ell^c(\Omega_t^c)$.

Параметри моделей визначаються в наступному вигляді:

$$\ell_t^3 = \frac{\sum_{i=2}^k \omega_i \omega_{i-1}}{\sum_{i=2}^k \omega_{i-1}^2}; \quad \ell_1^c = \frac{\sum_{i=2}^k \Omega_i \Omega_{i-1}}{\sum_{i=2}^k \Omega_{i-1}^2}, \quad (32)$$

де $\omega_k = \Omega_k - \Omega_{k-1}$ – різниця першого порядку.

Параметри Вейбулла у виразі (30) визначимо методом максимальної правдоподібності.

Формалізовані залежності, які використані для оцінки параметрів α_Ω і β_Ω мають такий вигляд

$$n\alpha_\Omega - \sum_{i=1}^n t_i^{\beta_\Omega} = 0; \quad \frac{n}{\beta_\Omega} = \sum_{i=1}^n \ln t_i - \frac{1}{\alpha_\Omega} \sum_{i=1}^n t_i^{\beta_\Omega} \ln t_i = 0, \quad (33)$$

де n – кількість інформації про час, коли БРЕО знаходиться в межах робочого допуску; t_i – час знаходження в допуску за результатами випробувань приладу ($i = 1, 2, \dots, n$).

Розв'язання рівнянь (33) проводиться з використанням методу випадкового пошуку.

Визначаємо мінімальний рівень зв'язності

$$\Delta E = |E_1| - |E_2|, \quad (34)$$

де E_1, E_2 – відповідно, перше і друге рівняння моделі (29).

На кожному кроці пошуку значень параметрів α_Ω і β_Ω приймаються величини $\bar{h}^{(N)} = \ell^{\xi^{(N)}}$, (75), де $\bar{h} = (\alpha_\Omega, \beta_\Omega)^N$; N – кількість пошукових кроків; ℓ – масштаб можливих меж змін $\bar{h}$; ξ – нормальний розподіл.

Якщо умова $\Delta E < \varepsilon_2$, де ε_2 – задана точність рішення, виконується, то пошук завершується. Отримані значення α_Ω і β_Ω дозволяють визначити показники за формулою (29). Розглянутий метод дозволяє оцінити та спрогнозувати стан інформаційної підтримки бортового обладнання за умови дотримання таких умов:

$$\Omega_k^c \leq \Omega_{\text{доп}}^c; \quad P(t) \geq P_{\text{зад}}; \quad \mu_t \geq t_{\text{пол}}, \quad (35)$$

де $\Omega_{\text{доп}}^c$ – допустиме значення «стрибка» Ω_{PI} ;

$P_{\text{зад}}$ – задана ймовірність знаходження змінної складової швидкості догляду в діапазоні на інтервалі польоту ПС $t_{\text{пол}}$.

В процесі випробувань БРЕО уточнюються параметри Вейбулла за наступним алгоритмом:

$$\begin{aligned}\alpha_{\Omega} &= \alpha_{\Omega}^{\text{cp}} - \frac{1}{n+K}(\alpha_{\Omega}^{\text{cp}} - \alpha_T); \\ \beta_{\Omega} &= \beta_{\Omega}^{\text{cp}} - \frac{1}{n+K}(\beta_{\Omega}^{\text{cp}} - \beta_T),\end{aligned}\tag{36}$$

де K , α_T , β_T – визначаються в результаті випробувань кількість запусків і параметрів.

Після уточнення α_{Ω} і β_{Ω} розраховуються $P(t)$, μ_t і відповідно до виразу (36) за результатами випробувань інформаційної підтримки БРЕО приймається рішення про можливість його установки на борт ПС.

Оцінку Ω_t^3 вводять в алгоритми управління за допомогою моделі (30) при значенні параметра, що визначений за результатами заводських випробувань бортового обладнання. Це дозволяє істотно скоротити необхідний інтервал для оцінки і прогнозування швидкості інформаційної підтримки бортового обладнання.

Отже, прогнозування стану БРЕО здійснюється на основі апіорної математичної моделі. На сучасному етапі з'явилася можливість використовувати на борту ПС еволюційні алгоритми побудови прогнозуючих моделей, які базуються на методах самоорганізації, генетичних підходах і нейронних мережах. Використовуються методи, що засновані на ідеях ідентифікації параметрів моделі з заданою структурою.

Також, розроблена структура скороченої динамічної експертної системи (ДЕС) і комплекс алгоритмів забезпечують працездатність і відмовостійкість обладнання ПС і дозволяють отримувати достовірну інформацію про параметри ПС.

Алгоритмічне забезпечення системи підвищення відмовостійкості вимірювального комплексу і авіоніки ПС, що базується на прогнозуючих нелінійних математичних моделях похибок вимірювальних систем і датчиків.

Методика вибору і реалізації діагностичних ознак при оцінці стану складних технічних систем ПС на землі і в польоті з використанням системи вбудованого контролю дозволить забезпечити процес діагностування від встановлення завдання і до отримання результатів практичного використання з розбиттям на три етапи: 1 – етап фізичного аналізу; 2 – етап математичного аналізу; 3 – етап технічної реалізації, це дозволило створити систему вбудованого контролю, яка забезпечує безпеку польоту.

Апаратні засоби контролю і діагностики, об'єднані в єдиний контрольний комплекс, включають усі необхідні елементи: $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$. На вхід випробувальної системи інформаційної підтримки бортового обладнання та на вхід синтезованої, у вигляді просторово-часового зразка, моделі подаються тестові сигнали. Відпрацьовуючи вхідні збурення, система

інформаційної підтримки БРЕО формує множину вихідних параметрів.:
 $Y = \{y_1^r, y_2^r, y_3^r, \dots, y_m^r\}$ вихідних параметрів.

Просторово-тимчасова модель, формує множину: $Y = \{y_1^{im}, y_2^{im}, y_3^{im}, \dots, y_m^{im}\}$, яка є реакцією, що відповідає повністю справному стану. Далі множини Y_{im} і Y_r порівнюються в аналізаторі, який виконує операцію: $Y_i^{im} - Y_i^r > A_i$, де A_i – порогове значення, задане для кожного контролюваного параметра технічною документацією на об'єкт контролю та діагностики. Розглянуто способи формування діагностичних моделей контролю ботів систем ПС. Розглянуто проблеми формування діагностичних ознак для оцінки стану об'єктів контролю. Визначено загальні підходи до вирішення приватних завдань синтезу динамічних моделей.

Інформаційна підтримка бортового обладнання ПС побудовані за принципом застосування бортової цифрової обчислювальної системи для вирішення комплексних завдань, завдань навігації, управління і взаємодії зі збереженням незалежності роботи окремих вхідних в комплекс систем.

Склад інформаційної підтримки бортового обладнання для конкретного типу ПС визначається функціональними вимогами до нього і завданнями, які розв'язуються ПС. Датчики інформації, що входять в БРЕО, здійснюють вимірювання і первинну обробку вихідних даних, а загальні завдання інтегральної обробки вирішує БЦОС.

Системи авіоніки повітряного судна (ПС) характеризуються наявністю похибок, які можуть призводити до втрати точності та працездатності, знижувати якість функціонування ПС і точність виконання поставлених завдань.

У роботі розглянуто алгоритм оцінювання — адаптивний фільтр Калмана, який є одним із базових компонентів системи контролю бортового радіоелектронного обладнання (БРЕО) та призначений для оцінювання похибок вимірювальних систем. Також розглянуто дискретне лінійне рівняння, що описує процес зміни похибок БРЕО.

$$x_k = \Phi_{k,k-1} x_{k-1} + \Gamma_{k-1} w_{k-1}, \quad (37)$$

де x_k – вектор стану; w_{k-1} – вектор вхідного обурення; $\Phi_{k,k-1}$ – матриця об'єкта; Γ_{k-1} – матриця входу. Вхідні обурення w_{k-1} передбачаються дискретним аналогом гаусівського білого шуму з нульовим математичним очікуванням і невідомою коваріаційною матрицею.

Частина вектора стану вимірюється:

$$z_k = H_k x_k + v_k, \quad (38)$$

де z_k – вектор виміру; v_k – вектор вимірювального шуму; H_k – матриця виміру. Помилки вимірів v_k передбачаються дискретним аналогом гаусівського білого шуму з нульовим математичним очікуванням і відомої коваріаційною матрицею R_k , $E[v_j w_k^T] = 0$ при будь-яких j і k .

Рівняння фільтра Калмана мають вигляд:

$$\begin{aligned}
\hat{x}_k &= \Phi \hat{x}_{k-1} + K_k v_k; \\
v_k &= z_k - H \Phi \hat{x}_{k-1}; \\
P_{k/k-1} &= \Phi P_{k-1} \Phi^T + K_{k-1} v_k v_k^T K_{k-1}^T; \\
K_k &= P_{k/k-1} H^T [H P_{k/k-1} H^T + R]^{-1}; \\
P_k &= (I - K_k H) P_{k/k-1}.
\end{aligned} \tag{39}$$

де $P_{k/k-1}$ – апіорна коваріаційна матриця помилок оцінювання; P_k – апостеріорна коваріаційна матриця помилок оцінювання; I – одинична матриця.

Іншими алгоритмами, які використовуються для підвищення точності БРЕО є еволюційні алгоритми: генетичний алгоритм (ГА), алгоритм самоорганізації та ін. Алгоритми самоорганізації – це багаторядні алгоритми, що базуються на гіпотезі селекції. Необхідно вирішити систему нормалізованих рівнянь Гауса:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N y_i = \alpha_0 N + \alpha_1 \sum_{i=1}^N g_{0,j}(x_i) + \alpha_2 \sum_{i=1}^N g_{1,j}(x_i) \\ \sum_{i=1}^N y_i g_{0,j}(x_i) = \alpha_0 \sum_{i=1}^N g_{0,j}(x_i) + \alpha_1 \sum_{i=1}^N g_{0,j}^2(x_i) + \alpha_2 \sum_{i=1}^N g_{0,j}(x_i) g_{1,j}(x_i) \\ \sum_{i=1}^N y_i g_{1,j}(x_i) = \alpha_0 \sum_{i=1}^N g_{1,j}(x_i) + \alpha_1 \sum_{i=1}^N g_{0,j}(x_i) g_{1,j}(x_i) + \alpha_2 \sum_{i=1}^N g_{1,j}^2(x_i) \end{cases} \tag{40}$$

При введенні в базис константи від вільного члена в рівняннях можна відмовитися.

$$\begin{cases} y_i = \alpha_{0,j} g_{0,j}(x_i) + \alpha_{1,j} g_{1,j}(x_i), j=1...C_N^2. \\ \sum_{i=1}^N y_i g_{0,j}(x_i) = \alpha_0 \sum_{i=1}^N g_{0,j}^2(x_i) + \alpha_1 \sum_{i=1}^N g_{0,j}(x_i) g_{1,j}(x_i) \\ \sum_{i=1}^N y_i g_{1,j}(x_i) = \alpha_0 \sum_{i=1}^N g_{0,j}(x_i) g_{1,j}(x_i) + \alpha_1 \sum_{i=1}^N g_{1,j}^2(x_i) \end{cases} \tag{41}$$

Отримані прогнозуючі моделі використовуються для отримання прогнозних значень ключових параметрів інформаційної підтримки бортового обладнання. Результати прогнозу надходять у БЗ, де порівнюються зі значеннями, які встановлені для режиму, що виконує функціонування ПС. Це дає можливість побудувати модель функціональної структурної схеми системи контролю та діагностики стану БРЕО на основі ДЕС з нечіткою логікою (Рис. 3.).

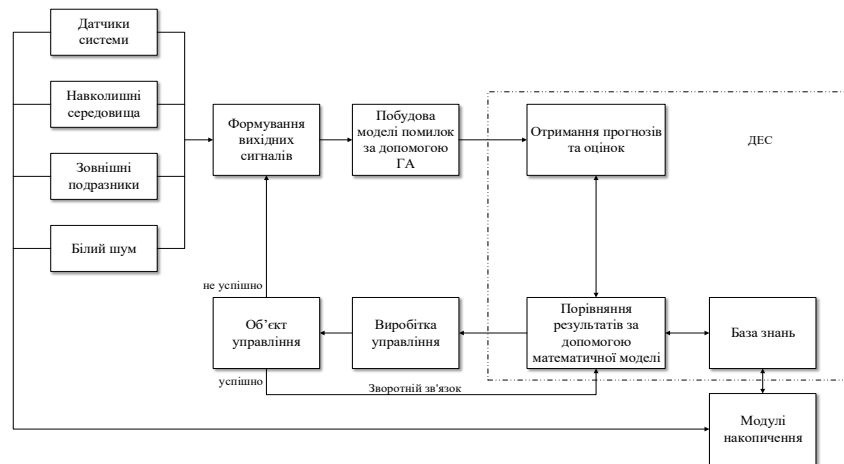


Рис. 3. Модель функціональної структурної схеми системи контролю та діагностики стану БРЕО на основі ДЕС з нечіткою логікою

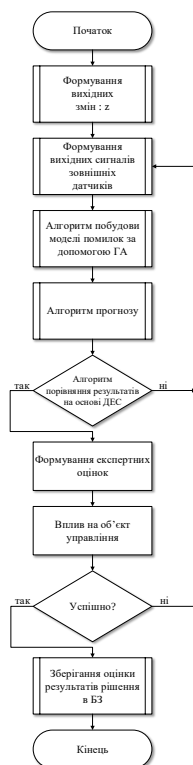


Рис. 4. Основні алгоритми роботи

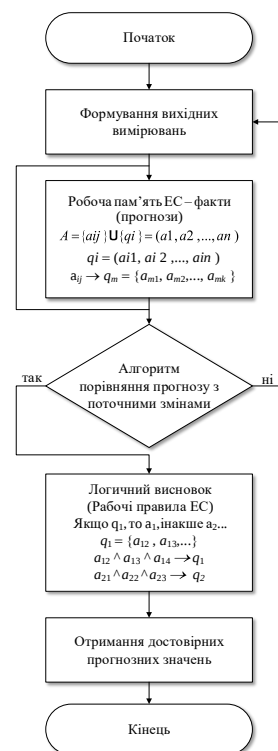


Рис. 5. Алгоритми порівняння за допомогою ДЕС

Також прогнозними значеннями ключових параметрів БРЕО поповнюються БД ДЕС – розроблена модель функціональної структури контролю та діагностики стану БРЕО на основі ДЕС з нечіткою логікою. З ДЕС інформація про майбутні порушення функціонування інформаційної підтримки бортового обладнання передається в СУ для формування керуючого впливу на БРЕО.

Діагностична матриця конкретної системи інформаційної підтримки бортового обладнання на певному режимі являє собою таблицю чисельних значень коефіцієнтів a_{ij} і b_{ij} , що дозволяють за відхиленнями ряду вимірюваних параметрів δu_{ij} визначати відхилення безпосередньо не вимірюваних параметрів стану δx_{ij} . Представлена інформаційна підтримка БД, в яку крім поточних вимірювань, включені прогнозні значення аналізованих параметрів

БРЕО. ДЕС з алгоритмом побудови прогнозуючих моделей, методом діагностичних матриць і правил нечіткої логіки дозволяє визначати ступінь достовірності навігаційної інформації ПС, а блок прийняття рішень, регулятор відновлюють працездатність БРЕО, використання оцінок і прогнозних значень похибок ІНС підвищує достовірність навігаційної інформації ПС.

За допомогою алгоритму оцінювання проводиться визначення оптимальних оцінок параметрів, які потім порівнюються з допущами та приймається рішення по контрольованому параметру.

Розглянуто алгоритмічні методи, що засновані на використанні алгоритмів діагностики, захисту від перешкод, відновлення та прогнозування.

Проведено моделювання тестової математичної моделі похибок горизонтального каналу базової системи БРЕО. Представлені результати роботи алгоритму діагностики похибок ІНС.

На Рис. 6. представлені похибки ІНС у визначенні швидкості, оцінки адаптивним фільтром Калмана, а з моменту $T1$ – прогноз, отриманий за допомогою ГА. При моделюванні для отримання похибки ІНС використана тестова математична модель. Так як в реальних умовах є інформація про оцінку, то вона використовується для діагностики стану інформаційної підтримки БРЕО. Запропоновано використовувати прогноз похибки ІНС, щоб заздалегідь виявити момент виходу систем із зони стійкої роботи.

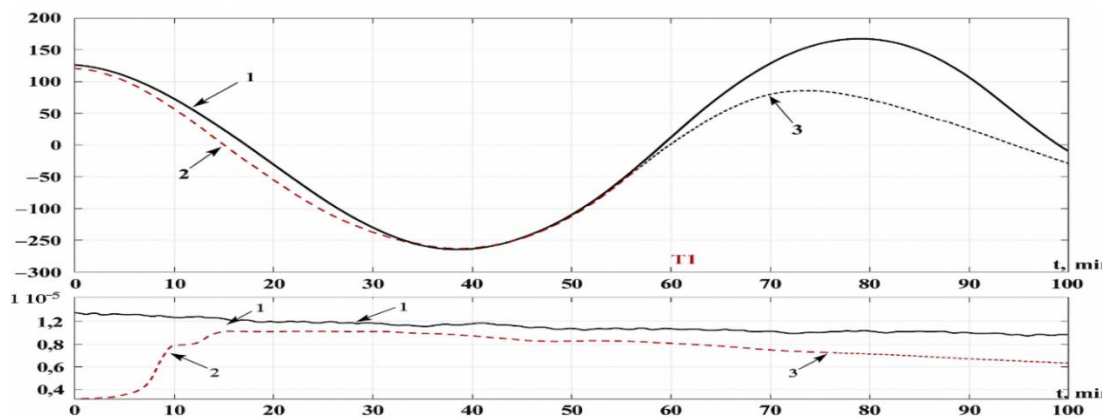


Рис. 6. Оцінювання похибки ІНС у визначенні швидкості за допомогою адаптивного фільтра Калмана та прогноз її зміни.

1 – похибка ІНС у визначенні швидкості; 2 – оцінка похибки ІНС фільтром Калмана; 3 – прогноз похибки ІНС.

На основі оцінок, отриманих адаптивним фільтром Калмана, за допомогою алгоритму самоорганізації або ГА будується модель похибок ІНС і з моменту часу $T1$ здійснюється прогноз. Вихід значень прогнозу із зони стійкої роботи ІНС, визначеної апріорно, сигналізує про можливу втрату працездатності системи – достовірність навігаційної інформації знижується.

Застосування ДЕС значно підвищує ефективність діагностування інформаційної підтримки БРЕО ПС, так як дозволяє оперативно аналізувати інформацію про особливості ситуації, що складається і приймати рішення по експлуатації даної інформаційної підтримки БРЕО ПС.

На основі прогнозу похибок інерціальної навігаційної системи (ІНС), яка входить до складу системи інформаційної підтримки бортового радіоелектронного

обладнання повітряного судна (БРЕО ПС), у момент часу T_2 приймається рішення про перемикання робочого контуру корекції. На інтервалі T_1 – T_2 використовується корекція у вихідному сигналі ІНС, а починаючи з моменту T_2 , реалізується структурна корекція в ІНС із застосуванням регулятора.

У порівнянні з ІНС, реалізованою за принципом незалежних каналів (ПНК), застосування вдосконаленої ІНС з розробленою системою корекції в умовах стохастичних збурень дозволяє підвищити точність за результатами математичного моделювання в середньому на 8–11 %.

У межах реалізації методу виявлення та ідентифікації відмов (FDI) побудовано діагностичну матрицю, яка відображає взаємозв'язок між контрольованими параметрами та можливими відмовами цифрової електронної системи (ДЕС).

$$\min \left(\begin{matrix} \mu_z(\Delta T_2^{(k)}) \& \mu_z(\Delta P_4^{(k)}) \\ \& \mu_z(\Delta P_6^{(k)}) \& \mu_z(\Delta F_C^{(k)}) \end{matrix} \right) \rightarrow 0,84 \quad (42)$$

Це означає, що вірогідність прийняття рішення про справність ІНС складає 0,84. Для рядка діагностичної матриці, відповідної 3% відхилення оцінки швидкості дрейфу ГСП, отримаємо:

$$\min(\mu_{z_{\in}}) \rightarrow 0,59 \quad (43)$$

Достовірність прийняття рішення про справність ІНС складає 0,59, а для її несправного стану коефіцієнт довіри буде 0,24. Дані величини говорять про те, що є висока ймовірність виходу ІНС із зони стійкої роботи.

Результати аналізу ДЕС збігаються з результатами досліджень, проведених в ході стендових випробувань ІНС.

Результати математичного моделювання продемонстрували працездатність розроблених алгоритмів. Аналіз результатів математичного моделювання показав, що розроблене алгоритмічне забезпечення систем підвищення відмовостійкості дозволяє підвищити ефективність інформаційної підтримки БРЕО ПС за рахунок завчасного виявлення моменту, коли інформація стає недостовірною і утримання БРЕО в зоні стійкої роботи.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз інформаційної підтримки процесу проектування та експлуатації комплексу бортового обладнання (аналіз сучасних інструментів, програмного забезпечення, баз даних, методів аналізу даних, систем моніторингу та інше) який показав їх обмежені можливості відносно функціоналу, що спрямованого на забезпечення доступності, актуальності, цілісності, комплексності, надійності, зручності використання та захищеності інформації, таким чином, дозволив визначити задачі дослідження, які орієнтовані на побудову ефективних систем інформаційних технологій для авіаційної промисловості та засобів інформаційної підтримки для оптимізації процесів проектування та експлуатації комплексу бортового обладнання.

2. Розроблено метод підтримки проектування інтегрованої модульної авіоніки, який дозволяє вдосконалити процес проектування комплексів бортового обладнання нового покоління, а саме підвищенню якості та

ефективності процесу проектування, скороченню часу розробки та впровадженню нових технологій у виробництво авіаційної техніки, сприяючи покращенню конкурентоспроможності та інноваційної авіаційної промисловості.

3. Розроблена модель процесу проектування комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки призначена для побудови математичних методів підвищення надійності та відмовостійкості, а також забезпечення якості та безпеки авіаційних систем. Ця модель дає змогу систематизувати й формалізувати процес врахування аспектів надійності та відмовостійкості на ранніх етапах проектування, що дозволяє виявляти та усувати потенційні проблеми ще до етапів виробництва та експлуатації. Результати її застосування можуть бути корисними для розробників, інженерів і дослідників, які працюють у сфері авіаційних технологій, сприяючи підвищенню якості й надійності авіаційних систем та забезпеченню безпеки польотів.

4. Розроблена графова модель структури функцій комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки для реалізації обчислювальної потужності та навантаження на мережу передачі даних є важливим інструментом для аналізу та оптимізації роботи авіонічних систем. Ця модель дозволяє систематизувати та візуалізувати взаємозв'язки між різними функціями та параметрами системи, що допомагає зрозуміти їх вплив на обчислювальні та комунікаційні процеси. Результати застосування цієї моделі можуть бути корисними для інженерів та дослідників, що працюють у сфері авіаційних технологій, для планування та оптимізації роботи бортових систем з урахуванням обмежень обчислювальної потужності та мережі передачі даних. Запропонований метод підтримки процесу проектування інтегрованої модульної авіоніки та розроблена модель процесу проектування комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки, дозволили розробити графову модель структури функцій комплексу бортового обладнання вхідних і вихідних параметрів для реалізації обчислювальної потужності, навантаження на мережу передачі даних. Моделі розроблені окремо для етапів проектування, та для етапу експлуатації. І в тому, і в іншому випадку моделі реалізовані у вигляді графів із різним ступенем деталізації. Для розробки, проектування (налагодження та виготовлення) важливо забезпечити пошук дефекту з глибиною пошуку до ланцюга або контактного майданчика.

5. Розроблена структурна модель процесу проектування складних автоматизованих систем управління комплексу бортового обладнання є важливим інструментом для вирішення проблеми виявлення несправностей автоматизованих систем. Ця модель дозволяє систематизувати та візуалізувати взаємозв'язок між етапами проектування, аналізувати ситуації виявлення аналогій та помилок, а також ефективно повідомляти та формулювати звіти щодо виявлених проблем. Розроблена структурна модель процесу проектування складних автоматизованих систем управління комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки, в якій за рахунок побудови V-подібної моделі даного процесу дозволила обґрунтувати основні її етапи та компоненти. Основні компоненти процесу створення програмного

забезпечення для експлуатації повітряних суден у сфері авіації обґрунтовані багаторівневою системою, що поділяється на програмно та апаратно-незалежні частини. Процес розробки програмного забезпечення фрагментується з етапів розробки дизайну в UML або системного моделювання, опису функціональності та алгоритму рішення реалізованих вимог для тестувальника, що дозволить вирішити проблеми ефективності і вартості проектування та експлуатації комплексу бортового обладнання.

6. Розроблена структурно-логічна модель уніфікованого автоматизованого робочого місця для підвищення достовірності контролю обчислювальної системи інтегрованої модульної авіоніки є важливим кроком у напрямку забезпечення безпеки та надійності авіаційних систем. Ця модель дозволяє систематизувати та візуалізувати робоче місце, забезпечуючи операторам зручний інтерфейс для контролю та аналізу обчислювальної системи. Вона також дозволяє виявляти та усувати потенційні проблеми ще до виробництва та експлуатації, що покращує якість та надійність авіаційних систем. Результати застосування цієї моделі можуть бути корисними для інженерів та дослідників, що працюють у сфері авіаційних технологій, для планування та оптимізації роботи бортових систем з урахуванням обмежень обчислювальної потужності та мережі передачі даних.

7. Розроблені методи оцінки ймовірності безвідмовної роботи структурно-логічної моделі уніфікованого автоматизованого робочого місця для контролю функціональних елементів обчислювальної інтегрованої модульної авіоніки на виробництві є важливим інструментом для забезпечення надійності та безпеки авіаційних систем. Ці методи дозволяють оцінити ймовірність виявлення та усунення потенційних проблем у роботі функціональних елементів ще до виробництва та експлуатації, що сприятиме підвищенню якості та надійності авіаційних систем.

8. Розроблена інформаційна технологія спрямована на підвищення відмовостійкості бортового обладнання, а також забезпечення безпеки та надійності авіаційних систем. Вона включає системи моніторингу та діагностики, програмне забезпечення для аналізу й прогнозування відмов, засоби автоматичного управління та резервування, а також методи аналізу даних для виявлення закономірностей і тенденцій у відмовах обладнання. У межах цієї технології за рахунок використання інтелектуальних підходів (інтелектуальної компоненти — акцептора дії, що відрізняється компактністю завдяки аналізу ключових параметрів вимірювальних систем), сформованих на основі теорії функціональних систем, а також систем підвищення відмовостійкості й апріорних моделей, реалізовано застосування еволюційних алгоритмів для побудови прогнозуючих моделей у сфері авіоніки. Це забезпечує своєчасне виявлення потенційних відмов і зменшує ризики відмов під час експлуатації.

9. Розроблений алгоритм контролю обчислювальної системи інтегрованої модульної авіоніки під час польоту повітряного судна для контролю функціональних елементів та подальшої розробки програмного забезпечення у складі уніфікованого робочого місця обчислювальної системи інтегрованої модульної авіоніки є важливим кроком у напрямку забезпечення

безпеки та надійності авіаційних систем. Цей алгоритм дозволяє систематизувати та автоматизувати процес контролю функціональних елементів обчислювальної системи під час польоту, що сприяє підвищенню безпеки та ефективності польоту.

10. Розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення інформаційної підтримки процесів проектування та експлуатації бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки, може бути використане для верифікації створених методів та моделей. Вони дозволяють виконувати аналіз та експерименти з використанням розроблених методів та моделей, що сприяє покращенню якості та надійності бортового обладнання.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kovalenko Y. Methods of developing integrated modular avionics systems. *Scientific Journal of Polonia University*. 2020. No. 43(6). P. 324–334.

2. Kovalenko Y., Kozlyuk I. Designing of technological processes of decision-making support information system in integrated modular avionics. *Problems of Informatization and Management*. 2020. No. 64. P. 4–15.

3. Kozlyuk I., Kovalenko Y. Functional bases of the software development and operation in avionics. *Problems of Informatization and Management*. 2020. No. 63. P. 49–63.

4. Kovalenko Y. Experiment test of the reliability of computer systems of integrated modular avionics. *Problems of Informatization and Management*. 2021. No. 65. P. 45–53.

5. Kovalenko Y., Kudrenko S. Methodology for testing languages for embedded avionics systems. *Problems of Informatization and Management*. 2022. No. 63. P. 44–52.

6. Конахович Г. Ф., Козлюк І. О., Коваленко Ю. Б. Оптимізація показників ефективності організаційної системи технічної експлуатації та оновлення радіоелектронних систем повітряних суден. Системні дослідження та інформаційні технології. 2020. № 4. С. 115–131.

7. Козлюк І. О., Коваленко Ю. Б. Надійність обчислювальних структур інтегрованої модульної авіоніки для конфігурацій апаратних засобів. Системні дослідження та інформаційні технології. 2021. № 2. С. 84–93.

8. Kovalenko Y., Kozlyuk I. Implementation of the integrated modular avionics application development complex according to the ARINC 653 standard. *The Bulletin of Zaporizhzhia National University: Physical and Mathematical Sciences*. 2020. No. 2. P. 28–36.

9. Kovalenko Y., Kozlyuk I. Functional methods of developing integrated modular avionics systems. *The Bulletin of Zaporizhzhia National University: Physical and Mathematical Sciences*. 2021. No. 1. P. 101–116.

10. Kovalenko Y., Kozlyuk I. Методи оцінки показників надійності авіаційної техніки за результатами випробувань та технічної діагностики. Наукоємні технології. 2018. № 3(39). С. 367–375.

11. Lakhno V., Kazmirchuk S., Kovalenko Y., Myrutenko L., Zhmurko T. Design of adaptive system of detection of cyber-attacks, based on the model of

logical procedures and the coverage matrices of features. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. No. 3(9). P. 30–38.

12. Коваленко Ю., Рибалка Л., Бурлака М. Модель захищеної автоматизованої системи управління на підприємстві. *Вісник Інженерної академії України*. 2017. № 2. С. 68–72.

13. Коваленко Ю. Система тестування на проникнення комп'ютерних мереж та систем. *Вісник Інженерної академії України*. 2015. № 1. С. 167–170.

14. Коваленко Ю. Системний аналіз проблеми багатокритеріального вибору варіанту удосконалення системи захисту інформації. *Захист інформації*. 2015. Т. 17. № 1. С. 38–43.

15. Коваленко Ю. Комплексний підхід до управління корпоративним інформаційним контентом. *Безпека інформації*. 2015. Т. 21. № 1. С. 70–76.

16. Козачок В., Коваленко Ю. Особливості побудови комплексних систем захисту інформації в розподілених корпоративних мережах. *Сучасний захист інформації*. 2015. № 1. С. 41–47.

17. Коваленко Ю. Захищений застосунок на основі технології VOIP. *Вісник Інженерної академії України*. 2015. № 2. С. 27–30.

18. Корченко А., Казмирчук С., Гололобов А., Коваленко Ю. Метод інкрементування порядку лінгвістичних змінних для систем аналізу та оцінювання ризику. *Захист інформації*. 2015. Т. 17. № 2. С. 101–111.

19. Коваленко Ю., Вишневська Н., Мішина І., Дзюбаненко А. Структурний аналіз мов програмування захищених застосунків для програмованих логічних контролерів. *Безпека інформації*. 2016. Т. 22. № 1. С. 38–43.

20. Коваленко Ю. Нейромережеві технології прийняття рішень управління складними соціотехнічними системами (ССТС) в реальному часі. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2016. № 1. С. 95–100.

21. Коваленко Ю. Комп'ютеризована система захищеного застосування на основі технології VOIP. *Збірник наукових праць ОДАТРА*. Одеса, 2016. С. 91–95.

22. Коваленко Ю. Аналіз оцінки надійності програмного забезпечення. *Вісник Інженерної академії України*. 2016. № 4. С. 93–97.

23. Kovalenko Y. A programmable logic controller (PLC); programming language structural analysis. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. P. 234–242.

24. Коваленко Ю., Рибалка Л., Бурлака М. Вдосконалення автоматизованої системи управління технологічної підготовки виробництва в авіаційній галузі. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 4. С. 209–214.

25. Коваленко Ю., Рибалка Л., Бурлака М. Аналіз надійності функціонування програмного забезпечення інформаційно-управляючих систем. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2017. № 4. С. 74–81.

26. Козлюк І., Коваленко Ю. Проектування технологічних процесів інформаційної системи підтримки прийняття рішень. *Збірник наукових праць*

Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2018. № 61. С. 14–23.

27. Козлюк І., Коваленко Ю. Структурний аналіз технологічного проектування і управління технологічним проектом у авіаційній галузі. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2018. № 59. С. 22–31.

28. Kovalenko Yu. B., Kozlyuk I. O. Method of developing automated information support for integrated modular avionics systems: monitoring, diagnostics and reliability improvement. *Visnyk of the National Aviation University*. 2024. Vol. 80. P. 40–52. DOI: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.80.19768>.

29. Shmatko O., Herasymov S., Milevskyi S., Balitskyi N., Pohasii S., Aleksiiiev M., Vlasov I., Melenti Y., Kovalenko Yu., Peleshok Y. Development of a method for assessing the efficiency of technical systems' computer dynamic simulators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 2, No. 9(134). P. 50–64. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.327558>.

30. Benzar A., Kovalenko Yu., Taranenko A., Balynska O., Balynskyi I. Contemporary strategies for managing organisational information security. *Journal of Information Systems Engineering & Management*. 2024. Vol. 10, No. 12(s). P. 505–513. DOI: <https://doi.org/10.52783/jisem.v10i12s.1859>.

31. Коваленко Ю. Б., Савчук М. М. Система інтелектуального фаззінгу. Безпека інформаційних технологій (ITSEC): тези доп. IV міжнар. наук. конф. (Київ, 20–23 трав. 2014 р.). – К., 2014. – С. 69.

32. Коваленко Ю. Б., Барлака М. А. Алгоритми планування, засновані на квантуванні в системах реального часу. Безпека інформаційних технологій (ITSEC) : тези доп. IV міжнар. наук. конф. (Київ, 17–19 трав. 2016 р.). – К., 2016. – С. 47.

33. Коваленко Ю. Б., Рибалка Л. П. Новітні технології управління корпоративним інформаційним контентом. АВІА-2015 : тези доп. XII міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 28–29 квіт. 2015 р.). – К., 2015. – Т. 1. – С. 121–122.

34. Коваленко Ю. Б., Мішина І. Ю. Проблема підбору варіантів удосконалення проектованої системи фаззінгу з використанням генетичних алгоритмів. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІПРТК-2015): тези доп. VIII міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 18–19 трав. 2015 р.). – К., 2015. – С. 266–268.

35. Коваленко Ю. Б., Мішина І. Ю. Розробка альтернативної системи захисту інформації на основі існуючого проекту. Політ. Сучасні проблеми науки: тези доп. XV міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів (Київ, 8–9 квіт. 2015 р.). – К., 2015. – С. 112.

36. Kovalenko Y. B. Specifics of the software for aircraft operation. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: тези доп. X міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 29–30 квіт. 2020 р.). – Чернігів, 2020. – Т. 2. – С. 156–157.

37. Коваленко Ю. Б., Рибалка Л. П. Аналіз методів зберігання, пошуку та структурування інформації // АВІА-2017: тези доп. XII міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 19–21 квіт. 2017 р.). – К., 2017. – Т. 1. – С. 439–432.

38. Коваленко Ю. Б., Ігнатенко П.Л. Системний аналіз комбінованого аналізатора бінарного коду BitBlaze. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем : тези доп. VI міжнар. наук.-практ. конф. (Чернігів, 26–29 квіт. 2016 р.). – Чернігів, 2016. – С. 306.

39. Коваленко Ю. Б. Структурна схема системи Elite Keylogger. Приладобудування: стан і перспективи : тези доп. XV міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 17–19 трав. 2016 р.). – К., 2016. – С. 86–87.

40. Kovalenko Yu. B. Principles of organizing the architecture of perspective onboard digital computing systems in avionics // POLIT. Challenges of science today : theses of reports (Kyiv, 5–9 Apr. 2021). – Kyiv., 2021. – P. 44–46.

41. Kovalenko Yuliia, Kovalchuk Olena. Zero Trust Security: Threats to Information Security in the Context of National Security // International and National Security: Theoretical and Applied Aspects : proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference (Dnipro, 14 Mar. 2025). – Dnipro : Dnipropetrovsk State University of Internal Affairs, 2025. – P. 41–43.

АНОТАЦІЯ

Коваленко Ю.Б. Інформаційна підтримка процесу проектування та експлуатації комплексу бортового обладнання інтегрованої модульної авіоніки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – «Інформаційні технології». – Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, 2025.

Дисертація присвячена вирішенню важливого науково-прикладного завдання, що має технічну спрямованість у галузі інформаційних технологій – розробці моделей, методів та інформаційної технології інформаційної підтримки процесу проектування та експлуатації комплексу бортового обладнання, побудованого на основі принципів інтегрованої модульної авіоніки.

Актуальність теми обумовлена наявністю протиріч між:

- високими вимогами до надійності та відмовостійкості бортового обладнання сучасних повітряних суден і обмеженими можливостями традиційних підходів до проектування та супроводу ІМА в умовах складної багатофакторної експлуатації;
- існуючими засобами інформаційної підтримки, які обмежені у своїй функціональності, та необхідністю створення цільової інформаційної підтримки для систем нового покоління, що вимагають використання сучасних технологій і стандартів для забезпечення гнучкості, масштабованості й автоматизації;
- необхідністю гармонізації базових засобів інформаційної підтримки процесів проектування та експлуатації бортового радіоелектронного обладнання з засадами інтегрованої модульної авіоніки, при цьому висока модульність і гнучкість системи призводить до збільшення складності, вартості та часу на сертифікацію, що негативно впливає на її надійність і продуктивність.

Недостатній рівень інтеграції моделей на етапах проектування і технічної експлуатації призводить до зниження ефективності процесів діагностики, прогнозування стану та прийняття рішень щодо технічного обслуговування.

Удосконалено метод підтримки процесу проектування ІМА, наукова новизна якого полягає у формалізації визначення множини параметрів функцій бортового обладнання на ранніх стадіях розробки. Запропоновано математичну модель проектування комплексу бортового обладнання, що забезпечує підвищення його надійності та відмовостійкості завдяки узагальненню функцій верхнього рівня та використанню стаціонарного марківського процесу.

Вперше побудовано графову модель структури функцій комплексу бортового обладнання, яка дозволяє здійснити розрахунок обчислювальних ресурсів, визначити рівень гарантії проектування та оцінити навантаження на мережу передачі даних. Запропоновано структурну модель проектування складних автоматизованих систем управління ІМА з урахуванням віртуальних

з'єднань, AFDX- та CAN-мережових технологій, що підвищують ефективність виявлення та ізоляції несправностей.

Вперше запропоновано структурно-логічну модель уніфікованого автоматизованого робочого місця для контролю обчислювальної системи ІМА, що забезпечує підвищення достовірності діагностики шляхом мажорювання результатів контролю різними модулями.

Вперше розроблено інформаційну технологію інформаційної підтримки, яка об'єднує графові, структурні та динамічні моделі у єдиний підхід до підтримки прийняття рішень, діагностики та прогнозування стану технічних систем ІМА. Реалізація запропонованих рішень дозволяє скоротити тривалість та вартість розробки, зменшити кількість помилок та підвищити ефективність функціонування бортового обладнання в умовах експлуатації.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили достовірність теоретичних положень та практичних розробок дисертаційного дослідження.

Результати дослідження впроваджені в діяльність ТОВ «СІТОН ДІДЖИТАЛ», а також використовуються в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем Державного некомерційного підприємства Державний університет «Київський авіаційний інститут».

Результати дисертаційної роботи знайшли відображення у звітах держбюджетних НДР № 5-2024/18.02 «Система забезпечення кібербезпеки та стійкості об'єктів критичної інфраструктури». Термін роботи: 01.03.2024р. – 30.06.2025р. Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут».

Ключові слова: інформаційна технологія, моделі та методи, автоматизовані системи управління, підтримка прийняття рішень, надійність технічних систем, архітектура обчислювальних систем, інтелектуальна діагностика, інтегрована модульна авіоніка.

ABSTRACT

Kovalenko Y.B. Information support for the design and operation of the integrated modular avionics onboard equipment complex. – Qualification research paper as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.13.06 – «Information Technologies». – State University «Kyiv Aviation Institute», Kyiv, 2025.

The dissertation considers an important applied scientific problem of a technical nature in the field of information technologies – the development of models, methods and information technologies to support the processes of designing and operating an on-board equipment complex based on the principles of integrated modular avionics (IMA).

The relevance of the topic is determined by the existence of contradictions between:

– high requirements for reliability and fault tolerance of modern aircraft on-board equipment and limited capabilities of traditional approaches to the design and support of on-board radio-electronic equipment (AEA) in complex multi-factor operating conditions;

- existing information support tools, which are limited in functionality, and the need to develop targeted information support for next-generation systems that require modern technologies and standards to ensure flexibility, scalability and automation;

- the need to harmonize the main information support tools for the design and operation of on-board radio-electronic equipment with the principles of AEA, while high modularity and flexibility of the system lead to an increase in complexity, cost and time of certification, which negatively affects reliability and productivity.

Insufficient integration of models at the stages of design and technical operation reduces the efficiency of diagnostic processes, condition prediction and decision-making in technical maintenance.

A method for supporting the AEA design process has been developed for the first time. Its scientific novelty lies in the formalization of the definition of parameter sets for on-board equipment functions at the early stages of development. A mathematical model for the design of an on-board equipment complex is proposed, which increases reliability and fault tolerance due to the generalization of high-level functions and the use of a stationary Markov process.

A graph model of the functional structure of an on-board equipment complex is developed for the first time. This model allows for the assessment of computing resources, the determination of the level of design assurance, and the assessment of the load on the data transmission network. A structural model for the design of complex automated IMA control systems is proposed, which takes into account virtual connections, AFDX and CAN network technologies, which increases the efficiency of fault detection and isolation.

A structural-logical model of a single automated workplace for controlling an IMA computing system is proposed for the first time, which increases the reliability of diagnostics by voting on the majority of results from different modules.

Information support technology has been improved by integrating graph, structural and dynamic models into a unified approach to decision support, diagnostics and forecasting of the state of IMA technical systems. The implementation of the proposed solutions allows to reduce the time and cost of development, minimize errors and improve the performance of on-board equipment in operational conditions. Experimental studies have confirmed the validity of the theoretical provisions and practical developments of the dissertation research.

The results of the study have been implemented in the activities of LLC «SITON DIGITAL», and are also used in the educational process of the Department of Telecommunications and Radioelectronic Systems of the State Non-profit Enterprise «Kyiv Aviation Institute of the State University».

The results of the dissertation are reflected in the reports of the state-funded research project No. 5-2024/18.02 «Cybersecurity and resilience system of critical infrastructure facilities», which was implemented from March 1, 2024 to June 30, 2025 by the State Non-Profit Enterprise «Kyiv Aviation Institute of the State University».

Keywords: information technology, models and methods, automated control systems, decision support, reliability of technical systems, architecture of computing systems, intelligent diagnostics, integrated modular avionics.

Здано в набір 04.06.2025.
Підписано до друку 06.06.2025.
Формат А4. Папір офсет. Друк ризогр.
Тираж 100 прим. Вид. №4593

Видавництво ОП "ШвидкоДрук"
Тел. +38 (096) 225-98-00; (066) 055-95-93
e-mail: druk07@ukr.net
Свідоцтво В02 №414529 від 27.11.2007 р.