Літальні апарати: аеродинаміка, силові установки, обладнання, озброєння та застосування

УДК 621.7396:621.396.933(082): 551.388

DOI: 10.30748/zhups.2021.68.01

Г.А. Калашник, М.А. Калашник-Рибалко

Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький

ОЗНАКИ ТА КРИТЕРІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ІНТЕГРОВАНОГО КОМПЛЕКСУ БОРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ СУЧАСНОГО ПОВІТРЯНОГО СУДНА ТА ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ ЙОГО РОЗВИТКУ

У статті представлено результати аналізу структури та принципів побудови сучасних комплексів бортового обладнання повітряних суден. Обґрунтовано математичну модель комплексу бортового обладнання повітряного судна. Удосконалені основні категорії функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання повітряного судна, розглянуті особливості ознак, показників, критеріїв його функціональної стійкості, границь та запасу функціональної стійкості. Розглянуто перспективні напрямки розвитку комплексів бортового обладнання сучасних повітряних суден. У статті представлено головні принципи створення функціональностійкого автоматизованого інтегрованого комплексу бортового обладнання повітряного судна.

Ключові слова: інтегрований комплекс бортового обладнання, повітряне судно, функціональна стійкість, ефективність функціонування, дестабілізуючі фактори.

Вступ

Постановка проблеми. Зміни льотно-технічних характеристик повітряного судна (ПС) характеризуються розширенням експлуатаційних областей у просторі станів з одночасним підвищенням надійності, точності та безпеки польотів. Основними шляхами забезпечення заданого рівня безпеки польоту в умовах відмови комплексу бортового обладнання (КБО) є зменшення впливу людського фактора при пілотуванні ПС за рахунок автоматизації управління і забезпечення мінімально необхідного рівня працездатності систем повітряного судна під впливом дестабілізуючих факторів шляхом оптимального перерозподілу апаратних, програмних і обчислювальних ресурсів. Функціональна стійкість КБО ПС є важливим напрямком вирішення проблеми забезпечення заданого рівня безпеки польотів.

Комплекси бортового обладнання сучасних ПС відносяться до вузького класу складних технічних систем, що потребує розробки нових підходів до забезпечення їх властивості функціональної стійкості (ФС) на етапах побудови та експлуатації. Тому одним з актуальних часткових завдань для вирішення цієї проблеми є обґрунтування комплексу ознак та критеріїв ФС КБО сучасного ПС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для оцінки якості варіантів побудови структури КБО використовують загальні критерії оцінок, що дозволяють визначити ефективність використання його для заданих режимів польоту. Можливими варіантами побудови структури є варіанти з найбільш високою оцінкою. Але вибір критерію оптимальності для КБО має певні труднощі. Вони викликані складністю його структури і необхідністю комплексної оцінки і порівняння усіх наслідків його створення, що проявляються у тактико-технічно (ТТХ)-економічних характеристиках усіх систем та підсистем, що входять до складу КБО.

Критерії ефективності складних авіаційних систем [1]:

- ТТХ, що забезпечуються конструктивно-технологічними рішеннями;
- безпека польотів, що забезпечується високим рівнем навичок льотного та обслуговуючого персоналу, потрібним рівнем надійності та ін.;
- безвідмовність, що забезпечується застосуванням високонадійної елементної бази і системи технічного обслуговування;
- відмовостійкість, що забезпечується застосуванням усіх видів резерву, можливістю деградації

системи лише до заданого рівня;

- живучість, що забезпечується захистом від терористичних дій і впливу зовнішнього середовища;

- стійкість, що забезпечується нечутливістю до збурень, реалізацією принципів управління за відхиленням;

- функціональна стійкість, що забезпечується управлінням апаратною, програмною, енергетичною та іншими надмірностями шляхом перерозподілу ресурсів з метою парирування наслідків позаштатних ситуацій.

Одним з напрямків підвищення ефективності КБО є реалізація концепції інтегрованої модульної авіоніки (ІМА) з використанням відкритої архітектури інтегрованого комплексу бортового обладнання (ІКБО) [2].

На сьогоднішній день виділяють два основних напрямки вдосконалення експлуатаційно-технічних характеристик ІКБО. Перший напрямок – це вдосконалення системи технічного обслуговування і ремонту бортового обладнання з метою забезпечення ефективних заходів по прогнозуванню і усуненню відмов. Тут низьку надійність, закладену при створенні виробів важко компенсувати високою якістю технічного обслуговування.

Другий напрямок – підвищення експлуатаційної надійності на етапі розробки і створення відмовостійких структур комплексу бортового обладнання, що дозволить реконфігурувати структуру, відключаючи відмовивший модуль і експлуатувати систему до чергового планового технічного обслуговування [2]. Але відповідна структура ІКБО відрізняється підвищеною складністю, величезною трудомісткістю створення програмного забезпечення, значними обчислювальними витратами на реалізацію алгоритмів реконфігурації.

Ми пропонуємо третій напрямок – забезпечення функціональної стійкості ІКБО, тобто забезпечення властивості збереження основних функцій, можливості виконувати необхідне, повне цільове завдання протягом заданого інтервалу часу або функціонування в умовах потоку відмов через вплив зовнішніх і внутрішніх дестабілізуючих факторів, можливо із деяким погіршенням своїх характеристик, але із збереженням виконання хоча б мінімально необхідних функцій шляхом завчасного прогнозування відмови і своєчасного парирування наслідків позаштатних ситуацій шляхом перерозподілу вже існуючої надмірності без введення додаткової [3]. Цей напрямок є більш перспективним і покликаний забезпечити ефективну експлуатацію ІКБО за станом в умовах потоку відмов та навмисних пошкоджень.

Ключові положення теорії функціональної стійкості були розвинені в роботах Машкова О.А. [3], Барабаша О.В. [4], Кравченка Ю.В. [5], Неділька С.М. [1], Обідіна Д.М. [6] та ін. Окремі завдання

забезпечення функціональної стійкості були відображені в роботах Авіжієніса А., Гуляєва В.А., Коростиля Ю.М., Тоценка В.Г., Баранова Г.Л., Конова А.А., Савченка В.А. та інших дослідників. Технологічною основою забезпечення ФС складних систем стало створення професором Машковим О.А. бортових інформаційно-керуючих комплексів, які дозволили комплексувати ресурси системи і здійснювати їх перерозподіл [3]. Нами був розроблений метод забезпечення ФС пілотажно-навігаційного комплексу літального апарату (ЛА) на окремих режимах польоту [7–10].

Результати дослідження ефективності функціонування КБО літака DA-42 за показниками ФС під впливом дестабілізуючих факторів показали, що він підлягає оптимізації для підвищення проблем його захищеності від збоїв, відмов та підвищення ФС в умовах дестабілізуючих впливів [11]. Забезпечення ФС вимагає використання для побудови перспективних комплексів бортового обладнання повітряного судна комплексного підходу. Згідно з ним, на першому етапі синтезується структура у цілому, а на другому – визначаються оптимальні параметри передаточних функцій елементів структури та зв'язків між ними [12]. Розмаїття критеріїв ефективності часто приводить до протиріччя між ними. Так, виникає протиріччя між структурною надмірністю, нерівномірністю завантаження елементів розподілених систем існуючих КБО ПС та вимогами точності, своєчасності надання пілотажно-навігаційної інформації, ефективності побудови траєкторій руху, забезпечення заданого рівня функціональності з обмеженням на вартість комплексу для оперативного парирування нештатної ситуації та формування відновлюючого управління в умовах впливу дестабілізуючих факторів. Таким чином, проблема визначення функціональної стійкості ІКБО ПС на сьогоднішній день залишається вирішеною не повністю, що підтверджує актуальність наукових завдань уточнення комплексу критеріїв та ознак ФС інтегрованого комплексу бортового обладнання сучасного ПС.

Метою статті є уточнення комплексу критеріїв та ознак функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання сучасного ПС та визначення перспективних напрямків його подальшого розвитку.

Виклад основного матеріалу

Комплекс бортового обладнання ПС – сукупність функціонально пов'язаних бортових систем і пристроїв, які забезпечують вирішення завдань пілотування, навігації та спеціального застосування ПС різними способами.

Комплекси бортового обладнання характеризуються такими основними рисами:

– об'єднанням в єдиний комплекс систем з різними фізичними принципами, що створюються різними галузями промисловості і обслуговуються фахівцями різних профілів;

– численними взаємними зв'язками між системами, від функціонування яких залежить працездатність всього комплексу в цілому;

– різноманітністю і інтенсивністю потоків інформації, що замикаються на бортову обчислювальну систему;

– необхідністю забезпечення ергономічних аспектів взаємодії льотного екіпажу з бортовим комплексом.

На сьогодні широко розвивається КБО на базі масштабованої інтегральної модульної авіоніки (ІМА) з використанням єдиного обчислювального середовища (платформи) [13]. Функції систем ІКБО в цьому випадку виконують програмні додатки, що поділяють спільні обчислювальні й інформаційні ресурси [13]. Концепція ІМА має на увазі повну централізацію обчислювальних функцій КБО на одному обчислювальному ядрі. На сьогоднішній день типовий КБО, побудований з архітектури ІМА, складається з кількох крейтів, їх кількість визначається складністю завдань і вимог компонування. Зазвичай крейтів два, що дозволяє розподіляти між ними завдання [2]. Все інше устаткування КБО, периферійне щодо крейти (індикатори відображення інформації; пульти управління; комплект датчиків; комплект обладнання радіозв'язку; комплект апаратури радіолокаційного обладнання; комплект радіонавігаційного обладнання; загальнолітакове обладнання та ін.) розташовується в залежності від вимог

до його розташування на борту ПС. Чітке розмежування крейти і периферійного обладнання призводить до того, що відмова функції комплексу стає можливою в разі несправності безпосередньо самого периферійного обладнання, лінії передачі даних або крейти [13–14].

Відкрита архітектура КБО ІМА дозволяє проводити заміну застарілих модулів, або впроваджувати до складу комплексу додаткові модулі різних виробників на основі загально використовуваних стандартів [14]. Це дозволяє багаторазово скоротити економічні та тимчасові витрати [14]. Важливою особливістю такої архітектури є необхідність виконання умови: структура КБО повинна реалізовуватися з використанням мінімальної номенклатури уніфікованих взаємозамінних відкритих стандартних виробів (модулів, систем) з високою продуктивністю і енергетичною ефективністю.

Складність створення повноцінного КБО ІМА складається з труднощів реалізації властивостей громіздкого програмного забезпечення, а також забезпечення відкритої архітектури. На сьогоднішній день типовий КБО, побудований з архітектурою ІМА, складається з кількох крейтів, їх кількість визначається складністю завдань і вимог компонування. Зростання висотно-швидкісних і маневрених параметрів сучасних ПС і їх багатозадачність вимагають від комплексу не тільки високої надійності і точності інформації, але і високої швидкості її надання. Перехід до ІМА дозволив перейти до інтеграції функцій, до створення бази даних функцій і сигналів в єдиному обчислювальному ядрі, а також комунікатора функцій на програмному рівні (рис. 1).

Рис. 1. Схема архітектури авіоніки повітряних суден нового покоління: БФПК – багатофункціональний пульт керування; БФІ – багатофункціональний індикатор; РЕК – радіоелектронний комплекс; ОЕК – оптико-електронний комплекс

Джерело: [13, С. 21].

В дану структуру повинні впроваджуватися високоінтегровані мультифункціональні системи основних функцій, наприклад, єдина програмно-керована радіосистема зв'язку, навігації та спостереження (рис. 2) [15].

Функції загальнолітакових систем також повинні максимально використовувати загальні обчислювальні ресурси комплексу.

Технологічну основу розвитку перспективних ІКБО ПС складають [13–16]:

1) функціонально стійкі багатодоменні КБО, побудовані на базі розподіленої модульної електроніки, з використанням віддалених концентраторів

даних, контролерів живлення, графіки і відео;

2) системи поліпшеного синтезованого і комбінованого бачення з використання гіперспектральних засобів технічного зору, вторинних засобів спостереження, супутникових навігаційних систем та ін.;

3) низькоенергозатратні пристрої передачі інформації;

4) використання нетрадиційних джерел та накопичувачів енергії;

5) бездротові сенсорні і актуаторні мережі, побудовані з використанням нано- і мікротехнологій;

6) нові технології аналізу значних обсягів даних, електронного зв'язку, тощо;

Рис. 2. Мережева відмовостійка архітектура інтегрованого комплексу бортового обладнання ПС: ФПЗ – функціональне програмне забезпечення; СПС – система повітряних сигналів; БІНС – безплатформна інерціальна навігаційна система; РБ – радіовисотомір; РЧ-модулі – радіочастотні модулі
Джерело: [15, С. 57].

7) інтегровані технології штучного інтелекту першого та другого типів, засновані на знаннях і логіці людських міркувань й засновані на методах машинного навчання на прикладах з використанням спеціалізованих нейропроцесорів;

8) використання функціонально стійких ергатичних систем, в яких завдання забезпечення ФС зводиться до таких процедур, як формалізація та опис дій людини-оператора в замкнутому контурі управління, розподіл функцій між людиною-оператором і апаратно-програмними комплексами, використання людино-машинних інтерфейсів, побудованих на сенсорних, мовних, окулографічних, міміко-жестулярних, нейрокомп'ютерних та інших принципах управління з використанням технологій віртуальної і доповненої реальностей;

9) використання мультифункціональної, повністю інтегрованої єдиної радіосистеми IMA/SDR/CNS,

яка програмно налаштовується, єдиної програмно-керованої радіосистеми зв'язку (інтегрованої IMA / SDR-системи зв'язку), навігації (інтегрованої IMA/SDR-системи навігації і посадки; об'єднаної радіосистеми IMA з функціями CNS/ATM і спостереження (інтегрованої IMA/SDR-системи спостереження).

На даний час проблема побудови високонадійного ІКБО вирішується використанням двох основних підходів: використанням елементів і апаратури підвищеної надійності; забезпеченням відмовостійкості.

Перший підхід передбачає тривалий час і високі витрати на розробку більш надійних елементів.

Другий підхід заснований на принципі відмовостійкості. Система вважається відмовостійкою або нечутливою до несправностей, якщо її організація передбачає усунення наслідків несправностей або

відмов елементів і програмного забезпечення. Для реалізації принципу відмовостійкості в загальному випадку необхідно: організувати діагностування технічного стану системи і забезпечити відновлення працездатності системи за результатами діагностування.

Реалізація перерахованих заходів стає можливою тільки на основі введення в систему різних видів надмірності: 1) апаратної (наявність дублюючих систем і додаткових ліній зв'язку); 2) часової (використання високопродуктивних мікропроцесорів для забезпечення багаторазового виконання програми); 3) інформаційної (наявність безлічі алгоритмів і реалізуючих їх програм для вирішення однієї і тієї ж задачі); 4) програмної (використання в програмному забезпеченні бортового обчислювального ядра ІМА системи дублюючих програм, що реалізуються при помилках в основних програмах або відмові дубльованих систем). Але введення надмірності в систему призводить до збільшення її вартості. При цьому не гарантується поліпшення якості функціонування системи.

Ми пропонуємо розглянути третій підхід – забезпечення функціональної стійкості ІКБО сучасних ПС. Особливість технології забезпечення функціонально стійкого ІКБО полягає в тому, що вона не передбачає необхідності виявлення причини відмови або пошкодження і включає послідовне виконання наступних процедур:

1) організація ефективного самодіагностування стану комплексу та виявлення факторів порушення його показників;

2) ідентифікація відмови або виявлення пошкодженого (некоректного) елемента системи (вузол, елемент, датчик), його локалізація;

3) перерозподіл ресурсів системи управління (інформаційних, обчислювальних, енергетичних) з метою парирування відмов таким чином, щоб зберегти здатність виконувати задані функції.

ІКБО ПС – це сукупність інтелектуальних елементів: бортових функціонально об'єднаних інформаційних засобів, обчислювально-програмних систем автоматизованого управління, систем індикації і сигналізації, призначених для вирішення завдань літаководіння і забезпечення роботи інших бортових систем літального апарата.

Математичну модель ІКБО ПС розглянемо на основі описі елементів структури за допомогою орієнтованого графа і представлену у вигляді розподіленої інтелектуальної системи. В ній множина вершин графа $G(V, L)$ відповідає множині інформаційних (інтелектуальних) модулів КБО, а множина ребер – множині зв'язків між інформаційними модулями. Дана модель враховує випадкову структуру верифікаційних зв'язків між модулями системи ІКБО ПС, дозволяє виконувати перевірки окремих

модулів комплексу з боку інших суміжних модулів у випадковій моменту часу.

Сучасний ІКБО ПС є сукупністю інтелектуальних інформаційних модулів, пов'язаних сукупністю інформаційних зв'язків. Тобто вони з оптимальною надмірністю за умов виконання заданих часових характеристик та надійності спроможні забезпечувати своєчасне проходження усіх інформаційних потоків у системі. Для цього визначається оптимальна структура інформаційних зв'язків, вибираються ефективні протоколи обміну інформацією між елементами системи та алгоритми і засоби обробки інформації, що дозволяють зменшувати інтенсивність інформаційних потоків. Кількісний бік інформаційного обміну визначають кількість і розташування у просторі джерел та споживачів інформації (інформаційних вузлів), потужність інформаційних потоків та їх залежність від часу. Необхідна і достатня умова ФС ІКБО ПС у такому разі полягає в існуванні такого складу елементів та зв'язків між ними, при якому система продовжувала б виконувати хоча б мінімально необхідні функції, а також мала б достатню надмірність для парирування наслідків позаштатних ситуацій.

У разі виходу з ладу одного з модулів ІКБО ПС в ньому повинно пройти відновлення за час, істотно менший, ніж це необхідно для збереження оперативної цінності обробленої інформації. Це досягається за рахунок функціональної, структурної, програмної, апаратної та часової надмірності ІКБО ПС та впровадження відновлення розподіленої системи без значної перебудови засобів верифікації.

Нехай у ІКБО ПС постійно виконується обмін даними, якщо між парою модулів знайдеться хоча б один маршрут передачі інформації. Тоді зовнішній вигляд графу ІКБО ПС, його структура у першому наближенні є функціонально стійкою, якщо граф є однокомпонентним і зв'язним. Але для значно розгалужених і багатoverшинних графів оцінювати функціональну стійкість лише за зовнішнім виглядом складно. Тому для оцінки структури ІКБО ПС можливо використовувати такі **показники функціональної стійкості** [3–6]:

1) ступінь вершинної зв'язності $\chi(G)$, як найменша кількість вершин (ребер), видалення яких разом з інцидентними їм ребрами приводить до незв'язності або однов'ершинного графу;

2) ступінь реберної зв'язності $\lambda(G)$, як найменша кількість ребер, видалення яких приводить до незв'язного графу;

3) ймовірність зв'язності $P_{ij}(t)$ як ймовірність того, що передача повідомлення від елемента i до елемента j буде здійснена за час не більше t .

Ймовірність зв'язності $P_{ij}(t)$ характеризує

зв'язність лише між однією парою вершин. Для розрахунку зв'язності між усіма парами вершин графа застосовують матрицю суміжності [3]:

$$A_M = \|a_{ij}\|, \quad j = 1 \dots n, \quad a_{mij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } l_{ij} \in L; \\ 0, & \text{якщо } l_{sij} \notin L. \end{cases} \quad (1)$$

Критерії функціональної стійкості ІКБО ПС.

Розподілена структура ІКБО ПС буде функціонально стійкою, якщо [17]:

1) ступінь вершинної зв'язності $\chi(G)$ задовольняє умові: $\chi(G) \geq 2$;

2) ступінь реберної зв'язності $\lambda(G)$ задовольняє умові: $\lambda(G) \geq 3$;

3) ймовірність зв'язності $P_{ij}(t)$ між кожною парою вершин буде не менш заданої P_{ij}^{zad} :

$$P_{ij}(t) \geq P_{ij}^{zad}; \quad i \neq j, \quad i, j = 1 \dots n, \quad (2)$$

де n – кількість вершин графа $G(V, L)$;

4) показники локальної ФС розгалуженої інформаційної мережі високопродуктивного обчислювального ядра авіоніки ІКБО ПС [18] повинні задовольняти умовам:

$$\{\omega(G) \geq 2 \cap k > 1\} \cup \{\mu(G) \geq 2 \cap k > 1\}, \quad (3)$$

де $\omega(G)$ – ω -поєднаність – максимальна кількість вершино-незалежних маршрутів між будь-якою парою вершин графа $G(V, L)$;

$\mu(G)$ – μ -сплетеність – максимальна кількість реберно-незалежних маршрутів між будь-якою парою вершин графа $G(V, L)$;

k – число елементів оптимального руйнування $\omega(\mu)$ -зв'язного графа;

$\omega(\mu)$ – показник локальної зв'язності, тобто найменша кількість вершин (ребер), видалення яких призводить до незв'язності графа.

Ознака границі ФС ІКБО ПС визначається таким чином [6; 17]: структура знаходиться на границі ФС, якщо граф структури зв'язний, у його складі є мости $N_L > 0$ або вузли з'єднання $N_V > 0$:

$$\{K = 1\} \cap \left[\{N_V > 0\} \cup \{N_L > 0\} \right], \quad (4)$$

де K – число компонентів графа;

$\{K = 1\}$ – умова зв'язності графа;

N_V – кількість вузлів з'єднання графа;

N_L – кількість мостів графа.

Запас функціональної стійкості ІКБО ПС визначається такими структурними показниками:

1) реберний запас стійкості Z_L – дорівнює потужності мінімального розрізу, що переводить од-

нокомпонентний граф у двохкомпонентний;

2) вершинний запас стійкості – мінімальна кількість вершин Z_V графа, після видалення яких разом з інцидентними їм ребрами граф переходить з однокомпонентного у двохкомпонентний;

3) запас ФС за показниками ймовірності зв'язності виражається квадратною матрицею, в якій кожен елемент буде мати значення $(P_{ij}^{zad} - P_{ij})$;

4) запас функціональної стійкості при використанні ІКБО ПС, на відміну від інших складних динамічних систем, вимагає, щоб деяка його властивість зберігалась на заздалегідь обраному інтервалі часу.

Запас функціональної стійкості ІКБО ПС на обраному інтервалі часу τ $P_{ЗАПАС\text{ }ФС}$ визначається як [1]:

$$P_{ЗАПАС\text{ }ФС} = 1 - P\left\{F_\tau[z(\alpha, t), t \leq \tau] \in B_{A_I}^\tau\right\}, \quad (5)$$

де $P\left\{F_\tau[z(\alpha, t), t \leq \tau] \in B_{A_I}^\tau\right\}$ – множина показників ФС;

$F_\tau = F_\tau[z(\alpha, t), t \leq \tau] \in B_{A_I}^\tau$ – однопараметричне

сімейство дійсних функціоналів;

$z(\alpha, t)$ – внутрішній стан системи, що є елементом фазового простору Z ;

α – параметр структури ІКБО, $\alpha \in A$, де A – простір параметрів;

t – поточний час, $t \in I$, де I – сукупність досліджених моментів часу;

τ – обраний інтервал часу для оцінки ФС;

$B_{A_I}^\tau$ – множина значень усіх функцій з B , досліджених у момент τ ;

$0 \leq \varepsilon \leq 1$ – деяке число.

Основні заходи забезпечення функціональної стійкості ІКБО ПС повинні включати:

– забезпечення технічної та інформаційної надійності, відновлення втраченої інформації і працездатності після ушкоджень, відмов, впливу дестабілізуючих факторів;

– забезпечення живучості, електромагнітної цілісності, радіоелектронного та інформаційного захисту;

– оптимальну апаратурну, програмну та часову надмірність;

– своєчасне виявлення та ідентифікацію відмов;

– парировання відмов з метою безперервного функціонування.

Дослідження показників, ознак та критеріїв функціональної стійкості вказують, що основним методом підвищення ФС розподіленої структури ІКБО ПС є підвищення зв'язності його структури.

Подальшим перспективним напрямком розвитку є розробка технологій створення функціонально стійкого автоматизованого (не обслуговуваного

людиною) КБО ПС на базі ІМА. Автоматизований ІКБО повинен включати до складу всю бортову авіоніку, а, можливо, і більший перелік загального літакового обладнання.

Основними властивостями такого комплексу функціонально стійкого автоматизованого ІКБО повинні бути:

1) наявність активної системи самодіагностування, що дозволяє своєчасно прогнозувати можливість появи відмови і запобігати її розвитку;

2) розпізнавання відмов (верифікації розподіленої бази знань) з можливістю локалізації в реальному режимі часу пошкоджених, відмовивших або некоректно функціонуючих модулів і систем;

3) своєчасне парирування можливих наслідків відмов шляхом перерозподілу ресурсів системи управління (інформаційних, обчислювальних, енергетичних) для збереження його функцій з відновленням розподіленої системи ІКБО без значної перебудови засобів верифікації. Побудова функціонально стійкого ІКБО ПС забезпечить можливість перерозподілу програмних, апаратних і функціональних ресурсів бортового обладнання в разі виникнення відмов. Це дозволить мінімізувати резервування і забезпечити досягнення максимально можливої безпеки та ефективності виконання або завершення польоту. У такому разі загальна задача синтезу функціонально стійкого ІКБО ділиться на окремі завдання: синтез алгоритму прогнозування виникнення відмов і синтез алгоритму завчасного парирування можливих наслідків відмов. Вирішення зазначених завдань дозволить сформулювати структуру просторово розподіленого інтегрованого КБО з керованою надмірністю і властивостями парирування наслідків відмов. Перспективні ІКБО ПС цивільної авіації, побудовані на такій технологічній основі, дозволять підвищити рівень безпеки польотів, істо-

тно знизити навантаження на екіпаж і збільшити ефективність застосування ПС.

Висновки

1. Проведений аналіз структури та принципів побудови сучасних КБО ПС, вимог до його окремих елементів визначив їх низьку функціональну стійкість. Подальший розвиток КБО пов'язаний зі значним збільшенням обсягу інформаційних потоків, значним ускладненням навігаційних завдань та посиленням вимог щодо часових обмежень на їх вирішення на окремих режимах польоту. Це потребує створення КБО, в яких не допускається вихід параметрів функціонування ПС за межі допустимих експлуатаційних вимог і забезпечується функціонування навіть в умовах впливу потоку зовнішніх та внутрішніх дестабілізуючих факторів.

2. Обґрунтовано математичну модель ІКБО ПС, основу на описі елементів структури за допомогою орієнтованого графа і представлена у вигляді розподіленої інтелектуальної системи.

3. Удосконалені основні категорії функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання ПС, розглянуті особливості ознак, показників, критеріїв його функціональної стійкості, границь та запасу ФС.

4. Визначено, що подальшим перспективним напрямком є розробка технологій створення функціонально стійкого автоматизованого інтегрованого КБО ПС.

5. Забезпечення ФС автоматизованого інтегрованого комплексу бортового обладнання ПС вимагає обґрунтування процедури синтезу його оптимально розподіленої структури в умовах впливу дестабілізуючих факторів та розробки відповідного математичного апарату, що буде подальшим напрямком досліджень.

Список літератури

1. Неділько С.М. Основи теорії функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом / С.М. Неділько. – Кіровоград: ДЛАУ, 2011. – 220 с.
2. Кивокурцев А.Л. Использование скользящего резервирования для построения отказоустойчивых интегрированных комплексов бортового оборудования / А.Л. Кивокурцев // Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-практической конференции “Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки”. – Воронеж, 2014. – С. 125-126.
3. Машков О.А. О функциональной устойчивости бортовых информационно-управляющих комплексов / О.А. Машков. – К.: КИИГА, 1990. – С. 79-83.
4. Кравченко Ю.В. Функціональна стійкість – властивість складних ТС / Ю.В. Кравченко, О.В. Барабаш // Труды академії. – 2002. – № 40. – С. 225-228.
5. Барабаш О.В. Построение функционально устойчивых распределенных информационных систем / О.В. Барабаш. – К.: НАУ, 2004. – 226 с.
6. Обідін Д.М. Математична формалізація функціональної стійкості процесів управління літальними апаратами / Д.М. Обідін // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 1(37). – С. 179-182.
7. Калашник М.А. Постановка задачи обеспечения функциональной устойчивости пилотажно-навигационного комплекса летательного аппарата на отдельных режимах полета / М.А. Калашник, Д.Н. Обидин // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2015. – № 4(36). – С. 27-30.
8. Калашник Г.А. Забезпечення стійкого функціонування засобів навігації літальних апаратів під впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів / Г.А. Калашник, Д.М. Обідін, М.А. Калашник // Системи обробки інформації. – 2016. –

№ 3(140). – С. 52-56.

9. Калашник М.А. Механізми забезпечення сталого функціонування засобів навігації літальних апаратів в умовах деструктивного впливу / М.А. Калашник // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2016. – № 2(38). – С. 3-8.

10. Калашник Г.А. Основні заходи щодо забезпечення ефективного функціонування систем управління, зв'язку та навігації в умовах впливу деструктивних геліогеофізичних збурень / Г.А. Калашник, М.А. Калашник-Рибалко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2018. – № 1(30). – С. 92-98. <https://doi.org/10.30748/nitps.2018.30.13>.

11. Калашник Г.А. Результати дослідження ефективності функціонування комплексу бортового обладнання літака DA-42 за показниками функціональної стійкості під впливом дестабілізуючих факторів / Г.А. Калашник, М.А. Калашник-Рибалко // Системи обробки інформації. – 2020. – № 4(163). – С. 27-36. <https://doi.org/10.30748/soi.2020.163.03>.

12. Калашник-Рибалко М.А. Удосконалення методу синтезу оптимально розподіленої структури інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата за показниками функціональної стійкості / М.А. Калашник-Рибалко, Г.А. Калашник // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2021. – № 1(42). – С. 41-49. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.42.05>.

13. Желтов С. Технология формирования информационно-вычислительных средств современной авиации / С. Желтов, Е. Федосеев // Фазотрон. – 2011. – № 4(16). – С. 20-28.

14. Желтов С.Ю. Перспективы развития комплексов бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации / С.Ю. Желтов, В.В. Косьянчук, Е.Ю. Зыбин // Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции “Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества”. – Москва, 16-17 мая 2018 г. – С. 5-6.

15. Чуянов Г.А. Перспективы развития комплексов бортового оборудования на базе интегрированной модульной авионики / Г.А. Чуянов, В.В. Косьянчук, Н.И. Сельвесюк // Технические науки. – 2013. – № 3(140). – С. 55-62.

16. Функціональна стійкість складних екологічно-небезпечних динамічних об'єктів / О.А. Машков, Р.К.Н. Аль-Тамими, Д.Д.Х. Лами, В.Р. Косенко // Екологічні науки. – 2015. – № 14(15). – С. 65-74.

17. Оре О. Графы и их приложение / О. Оре. – М.: Эдиториал, 2003. – 340 с.

18. Саланда І.П. Система показників та критеріїв формалізації процесів забезпечення локальної функціональної стійкості розгалужених інформаційних мереж / І.П. Саланда, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – № 1(41). – С. 122-126.

Надійшла до редколегії 02.03.2021

Схвалена до друку 13.04.2021

Відомості про авторів:

Калашник Ганна Анатоліївна

доктор геологічних наук
старший науковий співробітник
професор кафедри Льотної академії
Національного авіаційного університету,
Кропивницький, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9581-9865>

Калашник-Рибалко Мирослава Анатоліївна

кандидат технічних наук старший викладач
Льотної академії Національного
авіаційного університету,
Кропивницький, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0997-9609>

Information about the authors:

Ganna Kalashnyk

Doctor of Geological Sciences
Senior Research
Professor of Department of Flight Academy
of National Aviation University,
Kropyvnytskyi, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9581-9865>

Myroslava Kalashnyk-Rybalko

Candidate of Technical Sciences Senior Instructor
of Flight Academy
of National Aviation University,
Kropyvnytskyi, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0997-9609>

ПРИЗНАКИ И КРИТЕРИИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИНТЕГРИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ СОВРЕМЕННОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЕГО РАЗВИТИЯ

А.А. Калашник, М.А. Калашник-Рыбалко

В статье представлены результаты анализа структуры и принципов построения современных комплексов бортового оборудования воздушных судов. Обоснована математическая модель комплекса бортового оборудования воздушного судна. Усовершенствованы основные категории функциональной устойчивости интегрированного комплекса бортового оборудования воздушного судна, рассмотрены особенности признаков, показателей, критериев его функциональной устойчивости, границ и запаса функциональной устойчивости. Рассмотрены перспективные направления развития комплексов бортового оборудования современных воздушных судов. В статье представлены основные принципы создания функционально устойчивого автоматизированного интегрированного комплекса бортового оборудования воздушного судна.

Ключевые слова: интегрированный комплекс бортового оборудования, воздушное судно, функциональная устойчивость, эффективность функционирования, дестабилизирующие факторы.

SIGNS AND CRITERIA OF FUNCTIONAL STABILITY OF THE INTEGRATED COMPLEX OF ONBOARD EQUIPMENT OF THE MODERN AIRCRAFT AND PROSPECTIVE DIRECTIONS OF ITS DEVELOPMENT

G. Kalashnyk, M. Kalashnyk-Rybalko

The article presents the results of the analysis of the structure and principles of construction of modern complexes of aircraft onboard equipment. The analysis of the structure and principles of construction of modern complexes of aircraft onboard equipment, the requirements for its individual elements have determined their low functional stability. Further development of the complexes of onboard equipment is associated with a significant increase in the volume of information flows, a significant complication of tasks and the strengthening of the requirements for time limits for their solution in certain flight modes. This requires the creation of complexes of aircraft onboard equipment, which do not allow the overstepping the operation parameters of the aircraft beyond the allowable operational requirements and there is a provision of the operation even under the influence of the flow of external and internal destabilizing factors. The mathematical model of modern complexes of aircraft onboard equipment, based on the description of the elements of the structure with the help of an oriented graph and presented in the form of a distributed intelligent system, is substantiated. This model, in contrast to the existing ones, takes into account the random structure of verification links between the modules of the complex, allows to perform checks of individual modules of complexes of aircraft onboard equipment by other related modules at random points in time. The main categories of functional stability of aircraft integrated complex of onboard equipment are specified, features of signs, indicators, criteria of its functional stability, limits and stock of functional stability are considered. Perspective directions of development of onboard equipment complexes of modern aircraft are analyzed. The article presents the main principles of creation of functionally stable automated integrated onboard aircraft complex. It is determined that provision of the functional stability of the automated integrated complex of aircraft onboard equipment requires substantiation of the procedure of synthesis of its optimally distributed structure in the conditions of influence of destabilizing factors and development of the relevant mathematical apparatus.

Keywords: integrated aircraft equipment complex, functional stability, aircraft, the efficiency of the functioning, destabilizing factors.