М.А. Калашник-Рибалко, Г.А. Калашник

Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНО РОЗПОДІЛЕНОЇ СТРУКТУРИ ІНТЕГРОВАНОГО КОМПЛЕКСУ БОРТОВОГО ОБЛАДНАННЯ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ

У статті представлено результати удосконалення методу синтезу оптимально розподіленої структури інтегрованого комплексу бортового обладнання (ІКБО) літального апарату (ЛА) за показниками функціональної стійкості в умовах впливів дестабілізуючих чинників. Розглянуто загальні підходи щодо синтезу оптимальної структури інтегрованого комплексу бортового обладнання ЛА. Удосконалено метод синтезу оптимально розподіленої структури інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарату за показниками функціональної стійкості, в якому, на відміну від існуючих, застосовані методи оптимізації структури ІКБО ЛА за критерієм максимуму обраного критерію переваги з комплексу критеріїв функціональної стійкості, включаючи показники локальної функціональної стійкості з обмеженням на вартість побудови системи. Обґрунтований комплекс критеріїв (показників якості) для оцінки різних варіантів побудови системи ІКБО ЛА з визначенням критерію переваги. За критерієм переваги обрано узагальнений показник функціональної стійкості $FIKBO\ LA (Pij)$. Формалізовано постановку задачі синтезу оптимально розподіленої структури ІКБО ЛА за критерієм максимуму обраного критерію переваги з комплексу критеріїв функціональної стійкості з обмеженням на вартість побудови системи. Розв'язання задачі дозволяє з множини допустимих варіантів побудови ІКБО ЛА обрати раціональний та підвищити значення показників його функціональної стійкості до досяжного рівня без значних витрат.

Ключові слова: інтегрований комплекс бортового обладнання, дестабілізуючі фактори, функціональна стійкість, синтез оптимально розподіленої структури.

Вступ

Загальна постановка проблеми та зв'язок з практичними завданнями. Для авіаційних систем, чиє функціонування пов'язане з певним ризиком для життя людей, найбільш важливими є показники критерію безпеки польотів. Рішення на борту літального апарату (ЛА) багатьох завдань, таких як: управління польотом, забезпечення безпеки польоту, тактичне і спеціальне застосування ЛА і т.п. забезпечує комплекс бортового обладнання (КБО), який є сукупністю функціонально пов'язаних систем, комплексів, приладів, датчиків, обчислювальних пристроїв. Під час проектування КБО сучасних ЛА застосовують технології інтегрованої модульної авіоніки (ІМА) і принципи інформаційної інтеграції систем у складі КБО [1–2]. Це призвело до появи інтегрованих комплексів бортового обладнання (ІКБО) літальних апаратів. Серед інших завдань забезпечення функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарату під впливом дестабілізуючих факторів є частиною проблеми забезпечення безпеки польотів та одним з найбільш актуальних напрямків наукових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Професором Машковим О.А. вперше введено поняття функціональної стійкості динамічної системи [3], “як властивості системи, що полягає в здатності

виконувати хоча б установлений мінімальний об'єм своїх функцій при відмовах в інформаційній, обчислювальній та енергетичній частинах системи, а так само впливів зовнішніх дій, які передбачені умовами експлуатації”.

За стратегією забезпечення функціональної стійкості професора Машкова О.А., яка отримала подальший розвиток в роботах професорів Кравченка Ю.В. [4], Барабаша О.В. [5], Неділька С.М. [6–7], Обідіна Д.М. [8–9] парирування наслідків зовнішніх впливів, передбачених умовами, здійснюється у три етапи: виявлення; розпізнавання; парирування.

Забезпечення функціональної стійкості досягається застосуванням у складній системі різних, уже існуючих, видів надмірності (апаратної, структурної, часової, інформаційної, функціональної, навантажувальної та ін.) шляхом перерозподілу ресурсів з метою парирування наслідків позаштатних ситуацій. Особливу увагу в теорії функціональної стійкості звернено на те, що на етапі проектування не повинна вводитися додаткова надмірність, а парирування наслідків позаштатних ситуацій здійснюється перерозподілом уже існуючих ресурсів. Завдання полягає у виявленні вже існуючої надмірності і формуванні сигналів у потрібний момент на її перерозподіл. В цьому і є принципова відмінність задачі забезпечення функціональної стійкості від задачі побудови структурно-надмірних систем.

Найважливіша частина КБО – це пілотажно-навігаційний комплекс. Він призначений для вирішення на борту таких завдань: 1) числення, корекція і відображення поточних координат ЛА; 2) вимір, перетворення і відображення навігаційних параметрів ЛА; 3) обчислення, формування і індикація інформації про досягнення критичних режимів польоту ЛА; 4) формування сигналу траєкторного управління ЛА; 5) формування сигналів для системи автоматичного управління; 6) стабілізація ЛА в різних режимах. Для вирішення перерахованих завдань до складу ПНК включені: навігаційне та радіонавігаційне обладнання, радіокерування, бортові ЕОМ, системи відображення інформації, системи автоматичного управління і т.п. [10]. Представлені нами у роботах [11–13] результати досліджень відображають нові підходи щодо забезпечення функціональної стійкості пілотажно-навігаційного комплексу (ПНК) літального апарату (ЛА) на окремих режимах польоту, зокрема під впливом геліогеофізичних збурень [11; 13].

Теорія функціональної стійкості перебуває в стадії розвитку, і на наш погляд, формування показників функціональної стійкості як показників ефективності складних технічних систем є важливим напрямком наукових досліджень. Таким чином, функціональна стійкість (ФС) як властивість авіаційного комплексу (системи) забезпечується шляхом перерозподілу деякої існуючої в системі надмірності з метою парирування наслідків позаштатних ситуацій. Заходи, спрямовані на забезпечення або підвищення функціональної стійкості, у першу чергу забезпечують поліпшення характеристик відмовостійкості та живучості, але не обов'язково показників надійності окремих комплектуючих елементів і виробів, а так само тактико-технічних характеристик системи [3].

Сучасний КБО 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. Виникає проблема реалізації якісної високошвидкісної лінії зв'язку (ЛЗ), яка б дозволяла легко масштабувати склад і функціональність КБО. Необхідно зауважити, що зростання високошвидкісних і маневрених параметрів сучасних ЛА вимагають від КБО не тільки високої точності інформації, але і високої швидкості її надання.

У роботі [3] визначені загальні принципи синтезу складної технічної системи, зокрема КБО ЛА:

1) послідовний синтез “у загальному”, тобто підбір найбільш досконалих елементів внутрішньої структури та організації ефективної взаємодії між ними;

2) синтезу “у частковому”, що зводиться до визначення оптимальних за певними критеріями параметрів передаточних функцій елементів структури пілотажно-навігаційного комплексу літального апарата та зв'язків між ними.

Відомі декілька основних методів синтезу розподілених структур:

1) за критерієм мінімуму вартості при обмеженнях на обсяги переданої інформації, час передачі повідомлення і ступінь вузлової зв'язності структури [14];

2) синтез мережі на основі визначення основного мінімально зв'язуючого дерева графу структури [15];

3) синтез параметрів мережі при заданій топології графу структури (деревовидних, кільцевих, радіально-вузлових та ін.) [16].

Однак ці методи обмежені через дослідження лише певних класів структур за топологією та використання найбільш простого класу цільових функцій (лінійні, параболічні, монотонні, тощо), що виражають вартість, пропускну спроможність або час передачі повідомлення. Разом з тим питання синтезу оптимально розподіленої структури КБО ЛА за критерієм функціональної стійкості на сьогоднішній день не вирішувалось.

Для різних складних технічних систем розроблено багато методів оптимізації [3]. Але забезпечення ФС КБО літального апарата вимагає обґрунтування процедури синтезу його оптимально розподіленої структури в умовах впливу дестабілізуючих факторів та розробки відповідного математичного апарату.

Мета статті. Метою статті є удосконалення методу синтезу оптимально розподіленої структури інтегрованого комплексу бортового обладнання за показниками функціональної стійкості в умовах впливів дестабілізуючих чинників.

Виклад основного матеріалу

На етапі проектування функціональна стійкість КБО ЛА забезпечується введенням структурної, часової, апаратної та програмної надмірності. Для цього визначається оптимальна структура КБО ЛА за критерієм максимуму ефективності функціонування системи з введеною надлишковістю ліній зв'язку між елементами. Основні відмови і помилки при роботі КБО парируються програмним способом. Для цього в програмне забезпечення вводиться програмна та часова надмірність для контролю,

діагностування та дешифрування діагностичної інформації.

Забезпечення функціональної стійкості ІКБО ЛА включає в себе етапи визначення відмов, верифікації розподіленої бази знань (РБЗ) і парирування відмов інтегрованого комплексу бортового обладнання [7].

Після визначення достатньої верифікаційної інформації один з коректних модулів аналізує і дешифрує синдром з визначенням місця і виду відмови. На підставі цієї інформації формується відновлююче управління. Під час відновлення здійснюється інформаційний обмін по резервних маршрутах, реструктуризація РБЗ шляхом передачі справним модулям функцій несправних, відновлення функціонування реструктуризованої РБЗ та усіх верифікаційних процедур з незначною їх перебудовою [11–13]. Після відновлення корегуються протоколи (таблиці) маршрутизації із відповідною зміною розподіленої структури КБО ЛА.

Таким чином, структура КБО ЛА у процесі виявлення та дешифрування порушення нормального функціонування елементів постійно змінюється. Разом з тим, для якісного функціонування в умовах впливів необхідна оптимально розподілена структура комплексу бортового обладнання літального апарату. Тоді структура КБО ЛА є постійно динамічно змінною у процесі виявлення та дешифрування порушень нормального функціонування її елементів. У цілому функціонування КБО ЛА не порушується. Він продовжує функціонувати під впливом збурень, можливо, із деякими погіршеннями своїх характеристик, але з виконанням хоча б мінімально необхідних функцій.

Відновлюючим називається управління, що парирує наслідки відмов, збоїв, руйнувань, некоректностей інформаційного обміну з метою збереження, хоч і з деяким погіршенням, основних функцій системи. У загальному вигляді задача парирування полягає у визначенні нечіткого логічного виведення виду:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Забезпечення ФС ІКБО літального апарату досягається активним перерозподілом його наявних ресурсів для досягнення поставлених цілей функціонування. Це передбачає використання різних ефектів самоорганізації для відновлення внутрішньої структури згідно принципу “синергетичного” відновлюючого управління.

Завдання синтезу ІКБО ЛА загалом виглядає так. На першому етапі визначається структурна схема КБО та її параметри, здатні задовольнити обраний критерій оптимальності, який забезпечує ефективне функціонування комплексу, навіть за умов впливу потоку дестабілізуючих факторів. Це потребує синтезу КБО ЛА з оптимально введеною

надмірністю (структурною, апаратною, часовою, програмною). На другому етапі визначаються оптимально розподілені за певними параметрами елементи структури та зв'язки між ними.

Таким чином, при синтезі структури ІКБО ЛА на основі дискретної оптимізації послідовно виконується (рис. 1):

- обґрунтування комплексу критеріїв (показників якості), прийнятих до оцінки різних варіантів побудови системи, з визначенням критерію переваги;
- моделювання різних варіантів з бажаними змінами відомих параметрів системи і розрахунок показників якості;
- вибір методу оптимізації;
- визначення області ефективних варіантів на основі розгляду всього комплексу критеріїв, що відображають вимоги до системи ІКБО;
- вибір оптимальних варіантів за сукупністю критеріїв з визначенням раціонального варіанту шляхом застосування пріоритетного критерію переваги.

Основними шляхами підвищення якісних характеристик сучасного КБО є [1–3]:

- побудова на основі відкритої інтегрованої архітектури за концепцією ІМА (Integrated Modular Avionic);
- комплексування бортових систем і засобів;
- автоматичне діагностування коректного функціонування окремих систем та комплексів у цілому;
- підвищення функціональної стійкості ІКБО;
- підвищення надійності, запобігання неприпустимих режимів польоту та завчасне інформування про наближення до них, своєчасне виявлення критичної зміни параметрів, що можуть привести до відмови, попередження про можливість виникнення нештатної ситуації;
- керована комутація зв'язків між елементами модулів, що забезпечує створення динамічних обчислювальних підсистем різної конфігурації (управління активністю процесорів в системних взаємодіях);
- ідентичність застосовуваних модулів щодо протоколів зв'язку один з одним, формату даних, що передаються, базового набору системи команд мікропроцесорів і т.п.

Таким чином, структура багатомодульної системи може бути різною в кожен момент часу. Мережеві комутатори можуть містити локальну пам'ять, здатну запам'ятати кілька динамічних змін забезпечуваних ними зв'язків. Установка базових конфігурацій дозволяє здійснити безпосереднє статичну з'єднання між двома або більшою кількістю одночасно існуючих в обчислювальній системі потоків даних і абонентів [16].

Ключове значення для побудови багатомодульних обчислювальних систем структури ІМА має

проблема забезпечення високого рівня паралелізму обчислень.

Кількісний бік інформаційного обміну визначають кількість і розташування у просторі джерел та споживачів інформації (інформаційних вузлів), потужність інформаційних потоків та їх залежність від часу. Відкрита архітектура дозволяє здійснювати заміну відмовивших модулів або введення в дію додаткових модулів.

Очікується, що створення функціонально стійких інтелектуальних ІКБО ЛА дасть можливість успішно вирішити багато проблем побудови та освоєння нових поколінь ЛА, так як ці комплекси дозволяють:

- істотно розширити діапазони умов застосування ЛА;
- забезпечити комплексну оптимізацію виконання покладених на ІКБО функцій;
- підвищити безпеку польоту ЛА, в тому числі, і на граничних режимах.

Оптимізація синтезованих моделей ІКБО ЛА здійснюється за максимумом критерію переваги. При виникненні позаштатних ситуацій із множини допустимих варіантів обирається раціональний, за рахунок чого підвищується значення показників функціональної стійкості до досяжного рівня при обмеженнях на витрати.

Рис. 1. Метод синтезу оптимально розподіленої структури інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата за показниками функціональної стійкості

Джерело: розроблено авторами.

Оптимізаційні задачі розв'язують за допомогою різних методів за показником якості системи [16]. Для його визначення у загальному випадку використовують методи визначення глобального умовного екстремуму [16]. Але для синтезу функціонально стійких комплексів бортового обладнання літальних апаратів необхідно залучати додатковий критерій. Він виконує функції узагальненого критерію переваги одного значення вектора стану стосовно іншого [3].

Для знаходження критерію переваги порівнюються критерії якості різної розмірності, формуються поняття прийнятності рішення за певною сукупністю показників якості [7]. Запропонований метод забезпечення функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата базується на системному підході.

Це дозволяє декомпонувати завдання забезпечення функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата на етапи і застосувати процедуру розрахунку узагальненого ймовірнісного показника функціональної стійкості у вигляді згортки матриці зв'язності структури. Математична модель структури інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата описується випадковим графом. Під впливом дестабілізуючих факторів модель ІКБО ЛА динамічно змінюється і відрізняється ймовірнісним характером потужності множини зв'язків між елементами.

Обмеженість існуючих методів синтезу не дозволяє синтезувати розподілену структуру ІКБО ЛА за критерієм максимуму функціоналу якості [3]. Цей критерій залежить від ймовірності зв'язності структури. Вона не може бути вираженою в квадратах через наявність множини перехресних зв'язків між елементами, що не зводяться до тривіальних послідовно-паралельних з'єднань.

Оптимальний варіант побудови інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата потребує одночасного вибору оптимальної структури та визначення основних варійованих параметрів забезпечення найкращих показників ефективності її функціонування. Розв'язання цієї проблеми можливе застосуванням методів оптимізації структури за критерієм максимуму узагальненого показника функціональної стійкості $F_{\text{ІКБО ЛА}}$, обраного за критерій переваги з обмеженням на вартість побудови системи.

Узагальнений показник функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата обчислюється на основі матриці ймовірностей суміжності з урахуванням вагових коефіцієнтів b_{ij} :

$$F_{\text{ІКБО ЛА}} = f(P_{ij}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N b_{ij} \cdot P_{ij}, \quad (2)$$

де $F_{\text{ІКБО ЛА}}$ – функціонал якості системи;

b_{ij} – вагові коефіцієнти;

P_{ij} – ймовірність зв'язності двополусного графа із вершиною-витоком v_i і вершиною-стоком v_j ;

N – кількість вершин графу.

Вагові коефіцієнти b_{ij} визначаються на основі методу експертних оцінок. Ймовірність зв'язності двополусного графа з вершиною-витоком й вершиною-стоком розраховується на основі модернізованих оцінок Поліського [17].

Постановка задачі синтезу оптимальної розподіленої системи комплексу бортового обладнання літального апарата за узагальненим показником функціональної стійкості виглядає наступним чином.

Представимо модель інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата у вигляді зв'язаних інформаційними зв'язками N інформаційних вузлів комутації з їх відомим розташуванням. Нехай обмін інформацією між елементами інтегрованого комплексу бортового обладнання ЛА, базою знань валідних параметрів роботи елементів системи ІКБО здійснюється згідно з матрицею інтенсивності $Q = \|q_{ij}\|$ розміру $N \times N$, де q_{ij} – об'єм інформації, що передається від елемента i до елемента j за одиницю часу, $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, N$.

Показники обмеження оптимізаційної задачі синтезу структури інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата:

1) відома функція вартості C побудови системи шляхом визначення допустимих витрат за індексом заданої вартості $\varepsilon = 1, 2, \dots, n$, на її створення і експлуатацію $C_{\text{ДОП}}$;

2) необхідний рівень зв'язності $P_{\text{ПОТР}}$ між кожною парою елементів i та j ;

3) основні показники функціональної стійкості: а) ступінь вершинної зв'язності $\chi(G) \geq 2$, б) ступінь реберної зв'язності $\lambda(G) \geq 2$;

4) основні показники локальної функціональної стійкості розгалуженої інформаційної мережі ІКБО ЛА [18]:

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

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

$\mu(G)$ – μ -сплетеність – максимальне число 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 найменше число вершин (ребер), видалення яких призводить до незв'язності графа або формування одновершинного графа [18];

5) відповідність інформаційних зв'язків умовам:

а) виконання заданих часових характеристик за середній час затримки оповіщення, що передається від одного елемента до іншого, $\tau_{сер}$;

б) пропускна спроможність r_{ij} для кожного каналу для забезпечення своєчасного проходження усіх інформаційних потоків обсягом j_{ij} ;

б) для усіх маршрутів p_{ij} значення ймовірності зв'язності повинні відповідати P_{ij} , що відображають оптимальну структуру інформаційних зв'язків між модулями ІКБО ЛА для забезпечення вирішення усіх завдань, які вирішує ІКБО під час польоту, і не порушують додатковими зв'язками функціональних властивостей ІКБО.

Необхідно визначити оптимальну структуру розподіленої системи ІКБО ЛА, яка характеризується максимальним рівнем функціональності $F_{ІКБО\ ЛА}$, що залежить від ймовірності зв'язності P_{ij} при заданих обмеженнях [19]. Усі лінії зв'язку вихідної структури $G_0(V, L)$ повинні бути збережені у синтезованих структурах $G_\epsilon(V, L)$.

Для таких умов математична модель синтезу ІКБО ЛА має вигляд:

$$F_{ІКБО\ ЛА} = f(P_{ij}) \rightarrow \max, \quad i, j, \dots, N, \quad i \neq j \quad (3)$$

з наведеними обмеженнями:

$$C = \sum_i \sum_j C_{ij}(l_{ij}, p_{ij}, q_{ij}) \leq C_{ДОП}, \quad (4)$$

$$\forall p_{ij} \quad P_{ij} \geq P_{ПОТР}, \quad (5)$$

$$\chi(G) \geq 2; \lambda(G) \geq 2, \quad (6)$$

$$\{\omega(G) \geq 2 \cap k > 1\} \cup \{\mu(G) \geq 2 \cap k > 1\}, \quad (7)$$

$$G_0(V, L) \subseteq G_\epsilon(V, L), \quad (8)$$

$$\varphi_{ij} \leq \rho_{ij}, \quad (9)$$

$$\tau_{сер} \leq T_{\max}, \quad (10)$$

де N – кількість блоків інформаційного обміну ІКБО ЛА, що синтезуються;

$F_{ІКБО\ ЛА}$ – функціонал якості системи, що максимізується;

P_{ij} – ймовірність зв'язності між парою (i, j) елементів системи;

p_{ij} – усі маршрути із значенням ймовірності зв'язності P_{ij} ;

$\chi(G)$ – ступінь вершинної зв'язності;

$\lambda(G)$ – ступінь реберної зв'язності;

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

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

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

l_{ij} – довжина лінії зв'язку між елементами (i, j) ;

j_{ij} – обсяг потоку інформації, що передається;

r_{ij} – пропускна спроможність;

$\tau_{сер}$ – середній час затримки оповіщення, що передається від одного елемента до іншого;

$T_{\max}$ – максимально допустимий час на виконання заданих часових характеристик;

ϵ – індекс заданої вартості, $\epsilon = 1, 2, \dots, n$, що передбачає знаходження декількох структур заданої вартості $C_{ДОП\epsilon}$ для оптимізації та нарощування структури системи інформаційного обміну.

У результаті розв'язання задачі (3) синтезована оптимально розподілена система інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата з N елементів з визначеним значенням матриці суміжності ребер інформаційних зв'язків графа ІКБО ЛА. Підхід розв'язання декількох однокритеріальних оптимізаційних завдань із заданими значеннями $C_{ДОП\epsilon}$ приймається з метою уникнути розв'язання двокритеріальної задачі на графах [19].

У загальному випадку вигляд оптимальної системи інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата базується на основі усього комплексу критеріїв ФС та тих, що відображують умови до системи ІКБО ЛА $(F_{ІКБО\ ЛА}(P_{ij}))$, і коли кожний з них виступає самотійно. Тоді остаточне раціональне проектне рішення обирається шляхом

аналізу області ефективних варіантів і вибору раціонального варіанту із застосуванням обраного критерію переваги із комплексу критеріїв функціональної стійкості.

Визначення оптимального варіанту моделі інтегрованого КБО ЛА здійснюється за критерієм максимуму узагальненого показника функціональної стійкості $F_{\text{КБО ЛА}}(P_{ij})$, обраного за критерій переваги з обмеженням на вартість побудови системи. У даній постановці граф структури інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата має детерміновану кількість вузлів N і випадкову кількість зв'язків, а задача може бути розв'язана із застосуванням принципу максимуму Понтрягіна або іншими класичними методами.

Реалізація запропонованого методу дозволяє з множини допустимих варіантів обрати раціональний з урахуванням можливих позаштатних ситуацій в умовах дестабілізуючих впливів шляхом врахування ймовірнісного характеру множини зв'язків між елементами системи інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата. Це дозволяє підвищити значення показників функціональної стійкості КБО ЛА до досяжного рівня без значних витрат.

Висновки та перспективи подальшого розвитку у визначеному напрямку

1. Розглянуто загальні підходи щодо синтезу оптимальної структури інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата. Сучасні моделі та методи синтезу розподілених структур, як показав їх аналіз, не в повному обсязі спроможні розв'язати проблему низької функціональної стійкості КБО ЛА в умовах впливу на нього дестабілізуючих факторів. На основі сукупності розроблених моделей та методів забезпечення ФС інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата визначено нові підходи щодо синтезу його розподіленої структури за критеріями функціональної стійкості.

2. Удосконалено метод синтезу оптимально розподіленої структури інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарату за показниками функціональної стійкості, в якому, на відміну від існуючих, застосовані методи оптимізації структури КБО ЛА за критерієм максимуму обраного

критерію переваги з комплексу критеріїв функціональної стійкості, включаючи показники локальної ФС з обмеженням на вартість побудови системи. Метод дозволяє в умовах впливу дестабілізуючих факторів із множини допустимих варіантів обрати раціональний та за рахунок цього підвищити значення показників функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата до досяжного рівня при обмеженнях на витрати.

3. Удосконалений метод синтезу включає послідовне виконання таких завдань: обґрунтування комплексу критеріїв до оцінки різних варіантів побудови системи з визначенням критерію переваги; моделювання різних варіантів з бажаними змінами відомих параметрів системи і розрахунок показників якості; вибір методу оптимізації; визначення області ефективних варіантів на основі розгляду всього комплексу критеріїв, що відображають вимоги до інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата; вибір оптимальних варіантів за сукупністю критеріїв з визначенням раціонального варіанту шляхом застосування пріоритетного критерію переваги.

4. Обґрунтований комплекс критеріїв (показників якості) для оцінки різних варіантів побудови системи інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата з визначенням критерію переваги. За критерій переваги обрано функціональну якість системи КБО ЛА – узагальнений показник функціональної стійкості $F_{\text{КБО ЛА}}(P_{ij})$.

5. Формалізовано постановку задачі синтезу оптимально розподіленої структури КБО ЛА за критерієм максимуму обраного критерію переваги з комплексу критеріїв функціональної стійкості з обмеженням на вартість побудови системи. Розв'язання задачі дозволяє з множини допустимих варіантів побудови інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата обрати раціональний та підвищити значення показників його функціональної стійкості до досяжного рівня без значних витрат.

6. Подальші дослідження при структурному і параметричному синтезі інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата, окрім установлення факту стійкості, необхідно зосередити на визначенні запасу стійкості відповідно до конкретної ознаки.

Список літератури

1. Parkinson P. Safety-Critical Software Development for Integrated Modular Avionics / P. Parkinson, L. Kinnan. – Wind River, 2007. – 32 p.
2. Eveleens René L.C. Open Systems Integrated Modular Avionics – The Real Thing / L.C. Eveleens René // Mission Systems Engineering. – Educational Notes RTO-EN-SCI-176, 2006. Neuilly-sur-Seine, November, France: RTO. – Paper 2. – P. 2-1–2-22.
3. Артюшин Л.М. Оптимизация цифровых автоматических систем, устойчивых к отказам: монография / Л.М. Артюшин, О.А. Машков. – К.: КВВАИУ, 1991. – 89 с.

4. Кравченко Ю.В. Функціональна стійкість – властивість складних ТС / Ю.В. Кравченко // Труды академії. – № 40. – К.: НАОУ, 2002. – С. 225-228.
5. Barabash O. Methods of self-diagnosis of telecommunication networks based on flexible structures of test connections / O. Barabash, N. Lukova-Chuiko, A. Musiyenko // Riadenie bezpečnosti zložitých systémov: zborník príspevkov z medzinárodného vedeckého seminára, seminár 23-27 februára 2015. – Liptovský Mikuláš: Akadémia ozbrojených síl generála Milana Rastislava Štefánika, 2015. – Str. 226-231.
6. Навігаційне забезпечення Збройних сил України з використанням космічних систем: монографія / С.В. Козелков, К.С. Козелкова, С.М. Неділько та ін.; за ред. С.М. Неділька. – Кіровоград: Вид-во КЛА НАУ, 2013. – 628 с.
7. Неділько С.М. Основи теорії функціональної стійкості автоматизованої системи управління повітряним рухом: монографія / С.М. Неділько. – Кіровоград: ДЛАУ, 2011. – 220 с.
8. 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.
9. Обідін Д.М. Модель бази знань інтелектуальної системи управління високошвидкісного рухомого об'єкта на основі її верифікації / Д.М. Обідін, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // Системи обробки інформації. – 2014. – Вип. 5(121). – С. 3-6.
10. 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. – Вип. 4(36). – С. 27-30.
11. 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. – Вип. 3(140). – С. 52-56.
12. 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. – Вип. 2(38). – С. 3-8.
13. 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>.
14. Hosam M.F. A Neural Approach to Topological Optimization of Communication Networks, With Reliability Constraints / M.F. Hosam, S. Al-Sumait Lowlwa // IEEE Transactions on Reliability. – 2001. – Vol. 50. – No. 4. – P. 397-408.
15. Yi Pan Fault. Tolerance in the Block-Shift Network / Fault Yi Pan // IEEE Transactions on Reliability. – 2001. – Vol. 50. – No. 1. – P. 85-91.
16. Fitzgerald Kent. Reliability Modeling and Assessment of the Star-Graph Networks / Kent Fitzgerald, Shahram Latifi, Pradip K Srimani // IEEE Transactions on Reliability. – Dallas, March 2002. – Vol. 51. – No. 1. – P. 49-57.
17. Полесский В.П. Оценки вероятности связности случайного графа / В.П. Полесский // Проблемы Передачи Информации. – 1990. – Т. 26. – С. 27-31.
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. – Вип. 1(41). – С. 122-126.
19. Барабаш О.В. Алгоритм пошуку найкоротших маршрутів у мережі передачі даних автоматизованої системи управління / О.В. Барабаш, О.В. Чмут // Проблеми розробки і удосконалення засобів телекомунікацій та систем управління в Збройних Силах України: матеріали І науково-техн. конф., конф 28-29 листопада 2002 р. – Київ: ВІПІ НТУУ “КПІ”, 2002. – С. 39.

Надійшла до редколегії 28.11.2020

Схвалена до друку 05.01.2021

Відомості про авторів:

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

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>

Information about the authors:

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>

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>

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СТРУКТУРЫ ИНТЕГРИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

М.А. Калашник-Рыбалко, А.А. Калашник

В статье представлены результаты усовершенствования метода синтеза оптимально распределенной структуры интегрированного комплекса бортового оборудования (ИКБО) летательного аппарата (ЛА) по показателям функциональной устойчивости в условиях воздействий дестабилизирующих факторов. Рассмотрены общие подходы к синтезу оптимальной структуры интегрированного комплекса бортового оборудования ЛА. Усовершенствован метод синтеза оптимально распределенной структуры интегрированного комплекса бортового оборудования летательного аппарата по показателям функциональной устойчивости, в котором, в отличие от существующих, применены методы оптимизации структуры ИКБО ЛА по критерию максимума выбранного критерия преимущества из комплекса критериев функциональной устойчивости, включая показатели локальной функциональной устойчивости с ограничением стоимости построения системы. Обоснован комплекс критериев (показателей качества) для оценки различных вариантов построения системы ИКБО ЛА с определением критерия преимущества. Критерием преимущества избран обобщенный показатель функциональной устойчивости $F_{\text{ИКБО ЛА}} (P_{ij})$. Формализована постановка задачи синтеза оптимально распределенной структуры ИКБО ЛА по критерию максимума выбранного критерия преимущества из комплекса критериев функциональной устойчивости с ограничением стоимости построения системы. Решение задачи позволяет из множества допустимых вариантов построения ИКБО ЛА выбрать рациональный и повысить значение показателей его функциональной устойчивости до достижимого уровня без значительных затрат.

Ключевые слова: интегрированный комплекс бортового оборудования, дестабилизирующие факторы, функциональная устойчивость, синтез оптимально распределенной структуры.

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF SYNTHESIS OF THE OPTIMALLY DISTRIBUTED STRUCTURE OF AIRCRAFT EQUIPMENT INTEGRATED COMPLEX ACCORDING TO FUNCTIONAL STABILITY INDICATORS

M. Kalashnyk-Rybalko, G. Kalashnyk

The article presents the results of improving the method of synthesis of the optimally distributed structure of aircraft equipment integrated complex (AEIC) according to functional stability indicators under the influence of destabilizing factors. The general approaches to the synthesis of the optimal structure of aircraft equipment integrated complex are considered. The method of synthesis of optimally distributed structure of aircraft equipment integrated complex according to functional stability indicators is improved, in which, unlike existing, methods of optimization of structure of AEIC by the criterion of a maximum of the chosen criterion of advantage from a set of functional stability criteria, including indicators of local functional stability with restriction on construction cost of system with definition. The improved method of synthesis includes the consistent performance of the following tasks: substantiation of a set of criteria for the evaluation of various options for building a system with the definition of the criterion of advantage; modeling of different options with the desired changes in the known system parameters and the calculation of quality indicators; choice of optimization method; determination of the area of effective options on the basis of consideration of the whole set of criteria that reflect the requirements for AEIC; selection of optimal options by a set of criteria with the definition of a rational option by applying the priority criterion of advantage. The set of criteria (quality indicators) for an estimation of various points of construction of AEIC system with definition of criterion of advantage is substantiated. The generalized indicator of functional stability $F_{\text{AEIC}} (P_{ij})$ was chosen as the criterion of advantage. The problem statement of synthesis of the optimally distributed structure of AEIC according to the criterion of the maximum of the chosen criterion of advantage from the set of functional stability criteria with restriction on the cost of system construction is formalized. Solving the problem allows to choose a rational variant from a set of acceptable options for the construction of AEIC and to increase the value of its functional stability indicators to an achievable level without significant costs.

Keywords: aircraft equipment integrated complex, destabilizing factors, functional stability, synthesis of the optimally distributed structure.