

НАДІЙНІСТЬ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СТРУКТУР ІНТЕГРОВАНОЇ МОДУЛЬНОЇ АВІОНІКИ ДЛЯ КОНФІГУРАЦІЙ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ

І.О. КОЗЛЮК, Ю.Б. КОВАЛЕНКО

Анотація. Розглянуто задачу проектування перспективних обчислювальних систем у класі структур інтегрованої модульної авіоніки (ІМА). Запропоновано уніфіковану топологію внутрішньої мережі обчислювача на базі каналів обміну SpaceWire і варіанти її виконання для різних бортових додатків. Уведено еквівалентні схеми надійності кожної із частинних структур і проаналізовано ймовірність безвідмовної роботи кожної структури. Наведено сім'ї графічних залежностей. Подано аналіз існуючих принципів та алгоритмів організації тестування мультипроцесорних багатомодульних бортових цифрових обчислювальних систем, запропоновано новий алгоритм тестування мультипроцесора, що відповідає стандартам проектування програмного забезпечення для виробів ІМА. Розглянуто структуру уніфікованого автоматизованого робочого місця (АРМ) для перевірки функціональних модулів ІМА. Виявлено специфічні вимоги, властиві робочим місцям з перевірки інтегрованої авіоніки: підвищений рівень контролю апаратної складової виробів; можливість імітації стану відмови окремих компонентів авіоніки для перевірки режиму реконфігурування обчислювальної системи; модульну побудову програмного забезпечення з поділом тестів перевірки на компоненти, що виконуються на рівні кожного конструктивно-функціонального модуля і обчислювача в цілому в однозадачному і багатозадачному режимах; відкритість архітектури робочого місця, що забезпечує можливість зміни рівня складності керування виробом і налаштування одного класу складності; внутріпроектну уніфікацію як апаратних засобів, так і програмного забезпечення АРМ перевірки.

Ключові слова: інтегрована модульна авіоніка, обчислювальні системи, оцінювання показників надійності, ймовірність безвідмовної роботи.

ВСТУП

Авіаційні обчислювачі класу ІМА (інтегрована модельна авіоніка) являють собою мультипроцесорні багатомодульні обчислювальні системи [5; 13], до складу яких входять такі уніфіковані функціональні модулі (ФМ): модуль обчислювальний (МО), модуль графічний (МГ), модуль введення–виведення (МВВ), модуль масової пам'яті (ММП). Напряга живлення на ФМ забезпечує модуль напружень. На базі ФМ проєктуються: бортова цифрова обчислювальна система (БЦОС), бортова графічна станція, бортова інтерфейсна станція, бортова система картографічної інформації і ряд інших виробів авіаційної промисловості, що реалізують на борту літального апарата обчислювальні функції [9, 10].

Отже, суттєвими для оцінювання надійності обчислювачів класу ІМА є внутрішня структура обчислювача [15–19]; як така розглядається схема зв'язку ФМ у виробі і λ -характеристики надійності елементної бази ФМ, що входить у виріб. Надійність виробу оцінюється шляхом аналітичного виве-

дення виразу для ймовірності $P(t)$ безвідмовної роботи виробу і побудови сім'ї графіків залежності цієї ймовірності на заданому часовому інтервалі. Часовий інтервал характеризує очікуваний час безперервної роботи виробу в експлуатації.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На сучасному етапі розвитку авіаційного обладнання ускладнення завдань, які виконуються БЦОС, уведення нових структурних і схемотехнічних рішень зумовили появу різних підходів до організації тестування БЦОС. У разі ускладнення процедур тестового контролю дотепер використовують схеми перевірки БЦОС, що не задовольняють принципи побудови перспективних БЦОС [1– 3, 6, 11, 13, 14]:

- реалізація в обчислювачі послідовної схеми перевірки виявляється ресурсомісткою і недопустимою для пристроїв, що працюють у реальному масштабі часу за критерієм мінімізації директивного часу виконання бортового завдання;

- реалізація в обчислювачі паралельної схеми перевірки здійснюється одночасно для всіх конструктивно-функціональних модулів, однак внутрішні вузли модуля перевіряються, як і раніше, за послідовною схемою.

Згідно з концепцією ІМА [5, 7, 9, 12], кожен конструктивно-функціональний модуль у складі БЦОС містить обчислювальний вузол підтримання модуля (ВПМ), однією з функцій якого є управління і контроль стану справності модуля. ВПМ забезпечує управління вбудованими засобами перевірки, щоб стан справності, формування та збереження контексту параметрів діагностики, системне управління коштами резервування для парировання виявляються несправностей.

Наукова новизна дослідження полягає у розробленні математичної моделі оцінювання ймовірності безвідмовної роботи обчислювальної системи, що входить у програму забезпечення надійності повітряних суден, створюваних на етапі виготовлення і випробувань дослідних зразків виробів обчислювальної техніки авіаційного застосування. Тобто математична модель оцінювання ймовірності безвідмовної роботи повітряного судна ІМА, що враховує різні актуальні для авіаційної промисловості способи резервування функціональних елементів (модулів) повітряного судна: резервування на рівні підсистем, резервування на рівні однотипних функціональних модулів і ковзне резервування на рівні ідентичних функціональних модулів. А також запропоновано алгоритми і комплекс програм для контролю функціональних елементів повітряного судна ІМА, що застосовуються у складі уніфікованого АРМ на заводі-виробнику, що відрізняються від відомих модульним принципом побудови структури тестів з поділом модулів тестів за функціональною належністю кожного тестованого компонента.

Мета роботи: подання результатів оцінювання надійності обчислювальних структур ІМА для різних конфігурацій апаратних засобів.

Постановка проблеми: проектування виробів обчислювальної техніки у класі структур інтегрованої модульної авіоніки, призначених для експлуатації в авіаційній промисловості, пов'язане з необхідністю розробляти спеціалізовані алгоритми та програмні засоби контролю технічного стану апаратури. Алгоритми контролю гарантують задану повноту і достовірність перевірки під час проведення етапів тестування мультипроцесорів та їх компонентів на заводі-виробнику і в експлуатації.

Методи: контроль стану апаратури здійснюваний у складі АРМ (на заводі-виробнику) та автономно (в експлуатації). Алгоритми контролю передбачають перевірку фізичної справності компонентів авіоніки і перевірку логічних зв'язків компонентів (протоколів обміну), задіяних в обчислювальних процесах.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Варіанти внутрішньої структури обчислювачів ІМА. Універсальну функціональну схему бортового обчислювача класу ІМА зображено на рис. 1. Схема об'єднує набір ФМ типу МО, МГ, МВВ та ФМ типу ММП. Топологію внутрішньої мережі зв'язку ФМ побудовано за принципом «кожен з кожним». Фізичним середовищем поширення інформації є провідні лінії передавання даних відповідно до специфікації стандарту SpaceWire. Обчислювач побудований за двоконтурним принципом і складається з двох ідентичних підсистем [8].

На основі універсальної функціональної схеми обчислювача класу ІМА на практиці розробляються різні варіанти внутрішніх структур виробів авіоніки, що реалізуються на логічному рівні [3, 4]. Варто відзначити, що фізичне середовище поширення інформації у виробі відповідає схемі зв'язку (рис. 1), а логічне середовище поширення інформації організовується програмними засобами. Таким чином, не кожна фізична лінія передавання інформації виявляється задіяною в логічному протоколі обміну.

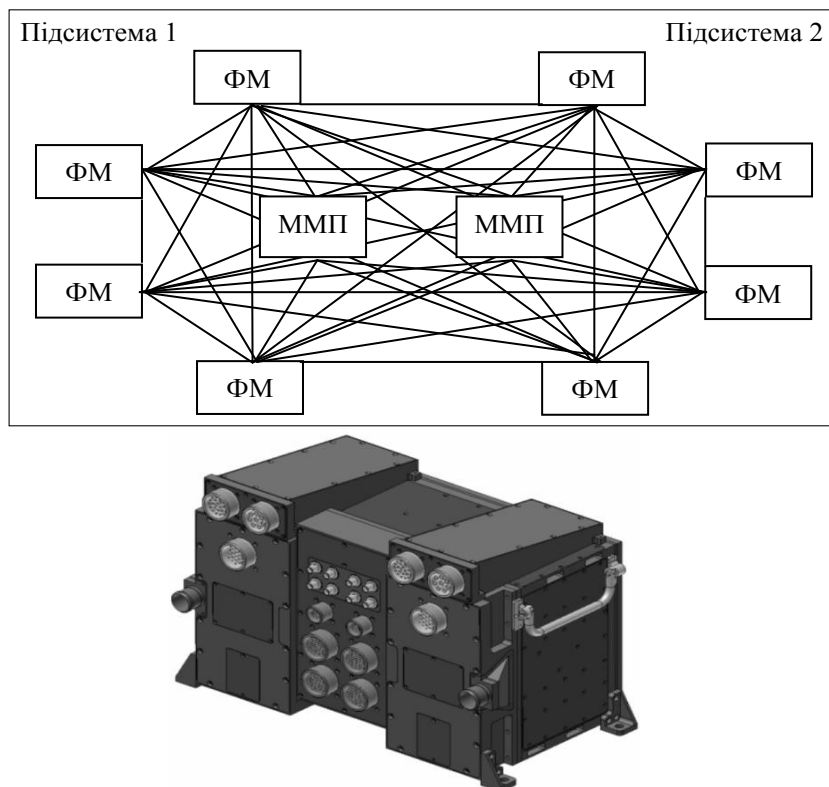


Рис. 1. Універсальна функціональна схема обчислювача класу ІМА (а) і зовнішній вигляд БЦОС (б)

Найбільш поширені варіанти виконання бортової апаратури показано на рис. 2, зокрема на рис. 2, *а* зображено схему внутрішнього зв'язку ФМ в обчислювальній системі, розділеній на дві ідентичні підсистеми, у кожній з яких задіяно по чотири ФМ і по одному ММП. У складі об'єкта (літального апарата) підсистеми резервують одна одну. У разі відмови одного із ФМ у підсистемі вся підсистема вважається несправною, функції обчислювача виконує резервна підсистема. На рис. 2, *б* зображено схему внутрішнього зв'язку ФМ у БЦОС, що складається із чотирьох ФМ різного типу. Кожен ФМ резервується ідентичним ФМ такого ж типу. Загальна кількість функціональних модулів в обчислювальній системі відповідає варіанту рис. 2, *а*. Модулі ММП резервують один одного. Завдання між підсистемами не розподіляються; кожен модуль підсистеми резервує ідентичний модуль іншої підсистеми. На рис. 2, *в* зображено схему внутрішнього зв'язку ФМ в обчислювальній системі, що складається з двох ММП і восьми ідентичних ФМ, наприклад, МО. Обчислювальна система використовується в разі, коли для виконання заданих функцій авіоніки потрібен обчислювальний ресурс тільки чотирьох ФМ і одного ММП; друга група модулів в тому ж складі перебуває в резерві. Усі ФМ, що перебувають у резерві, можуть замінити будь-який із ФМ, що відмовили в польоті, тобто резервування в обчислювачі ІМА реалізовано не на рівні підсистем, а на рівні ФМ. На рис. 3 зображено еквівалентні схеми для кожної зі схем, зображених на рис. 2.

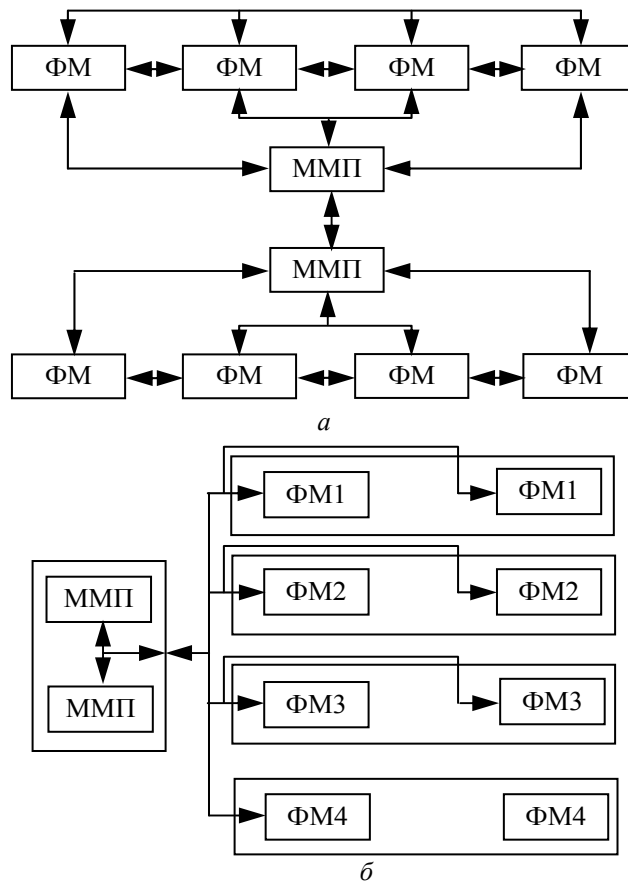


Рис. 2. Варіанти виконання бортових обчислювальних систем класу ІМА
а — резервування на рівні підсистем; *б* — резервування на рівні однотипних ФМ

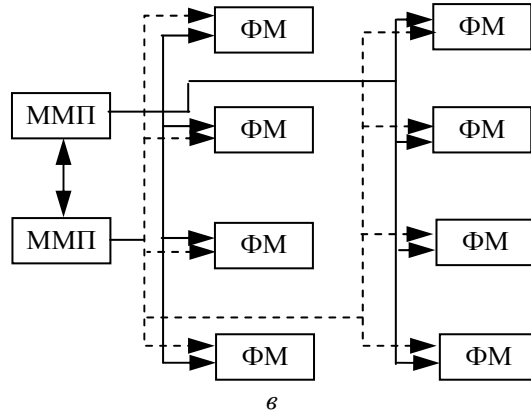


Рис. 2. Закінчення. (Див.також с.87)

Оцінювання ймовірності безвідмовної роботи обчислювачів ІМА.
 Нехай ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ одного ФМ знаходиться за формулою

$$P_{\text{ФМ}}(t) = e^{-\lambda t},$$

де λ — інтенсивність відмов елементної бази модуля; t — час польоту літального апарата.

У варіанті еквівалентної схеми надійності (рис. 3, а) ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ обчислювача ІМА буде визначатися за формулою

$$P_1(t) = 1 - (1 - (P_{\text{ММП}}(t) P_{\text{ФМ}}^4(t))^2), \quad (1)$$

де $P_{\text{ММП}}(t)$ — ймовірність безвідмовної роботи ММП; $P_{\text{ФМ}}(t)$ — ймовірність безвідмовної роботи ФМ.

У варіанті еквівалентної схеми надійності (рис. 3, б) ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ обчислювача ІМА становитиме

$$P_2(t) = [1 - (1 - P_{\text{ММП}}(t))^2] [(1 - (1 - P_{\text{ФМ1}}(t))) (1 - (1 - P_{\text{ФМ2}}(t))) \times \\ \times (1 - (1 - P_{\text{ФМ3}}(t))) (1 - (1 - P_{\text{ФМ4}}(t)))] , \quad (2)$$

де $P_{\text{ФМ}_i}(t)$ — ймовірність безвідмовної роботи для i -го ФМ.

У варіанті еквівалентної схеми надійності (рис. 3, в) ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ обчислювача ІМА буде визначатися як

$$P_3(t) = [1 - (1 - P_{\text{ММП}}(t))^2] \left[\sum_{i=4}^8 [C_i^8 P_{\text{ФМ}}^i(t) (1 - P_{\text{ФМ}}(t))^{8-i}] \right]. \quad (3)$$

Якщо вважати ймовірність безвідмовної роботи всіх ФМ приблизно однакою, тобто до складу кожного ФМ входить приблизно одна й та сама кількість радіоелементів з порівнянними показниками λ -характеристик, вирази (1)–(3) набудуть вигляду відповідно:

$$P_1(t) = 1 - (1 - P^5(t))^2; \quad (4)$$

$$P_2(t) = [1 - (1 - P(t))^2] \prod_{i=1}^4 [1 - (1 - P(t))^2]; \quad (5)$$

$$P_3(t) = [1 - (1 - P(t))^2]^2 \left[\sum_{i=4}^8 [C_i^8 P^i(t) \cdot (1 - P(t))^{8-i}] \right]. \quad (6)$$

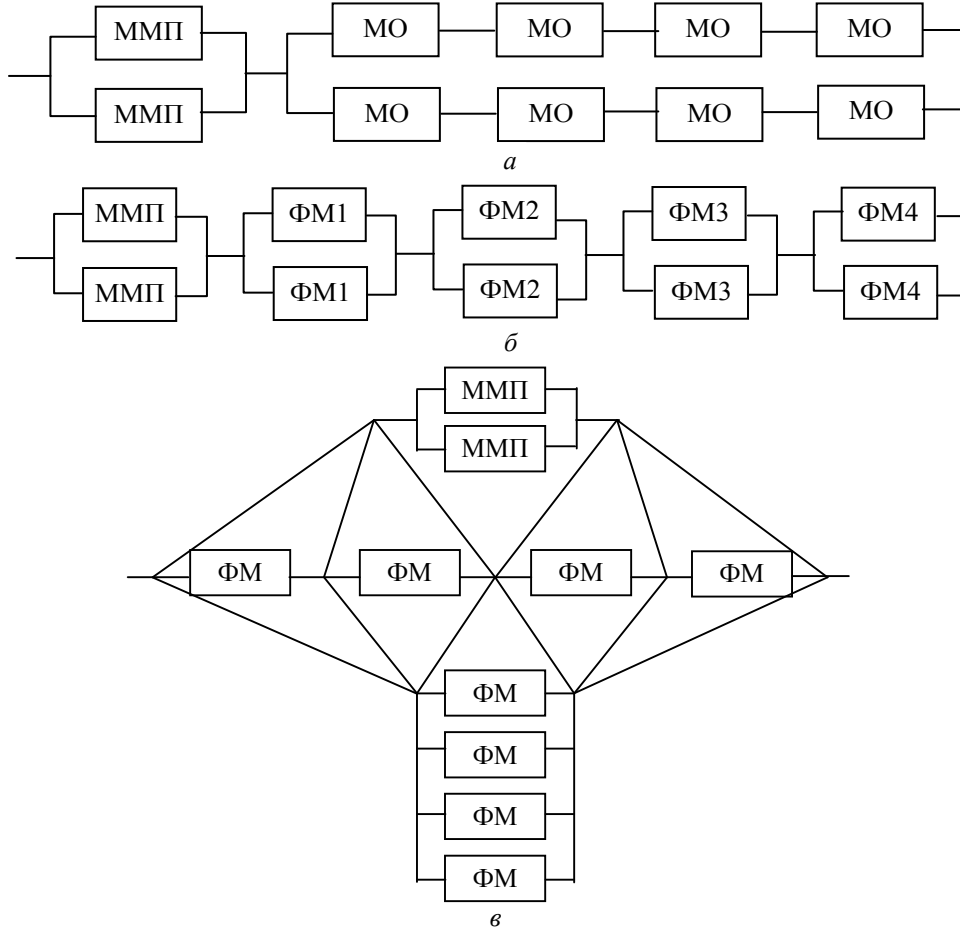


Рис. 3. Еквівалентні схеми надійності: *a* — резервування на рівні підсистем; *б* — резервування на рівні однотипних ФМ; *в* — ковзне резервування на рівні ідентичних ФМ

Сім'ї залежностей для різних варіантів застосування схем резервування в обчислювачах ІМА показано на рис. 4; зокрема на рис. 4, *a* — залежність ймовірності безвідмовної роботи для варіанта виконання обчислювальної системи на цивільному літаку. Для виконання розрахунків взято час польоту літального апарата — 25 год.

Суцільною лінією на рис. 4 показано криву, що відповідає ймовірності безвідмовної роботи для еквівалентної схеми надійності, зображеної на рис. 3, *a*, штрих-пунктирною — криву, що відповідає ймовірності безвідмовної роботи для еквівалентної схеми надійності рис. 3, *б*, пунктирною — криву, що відповідає ймовірності безвідмовної роботи для еквівалентної схеми надійності рис. 3, *в*.

Для побудови графіків для визначеності взято λ -характеристику надійності ФМ, що становить $50 \cdot 10^{-6}$ 1/год.

Залежність ймовірності безвідмовної роботи обчислювача ІМА для варіанта виконання апаратури на морському судні показано на рис. 4, *б*. Час плавання — 4 дні (96 год). Залежність ймовірності безвідмовної роботи для

варіанта виконання обчислювальної системи на космічному апараті показано на рис. 4, в. Час польоту — 5000 год.

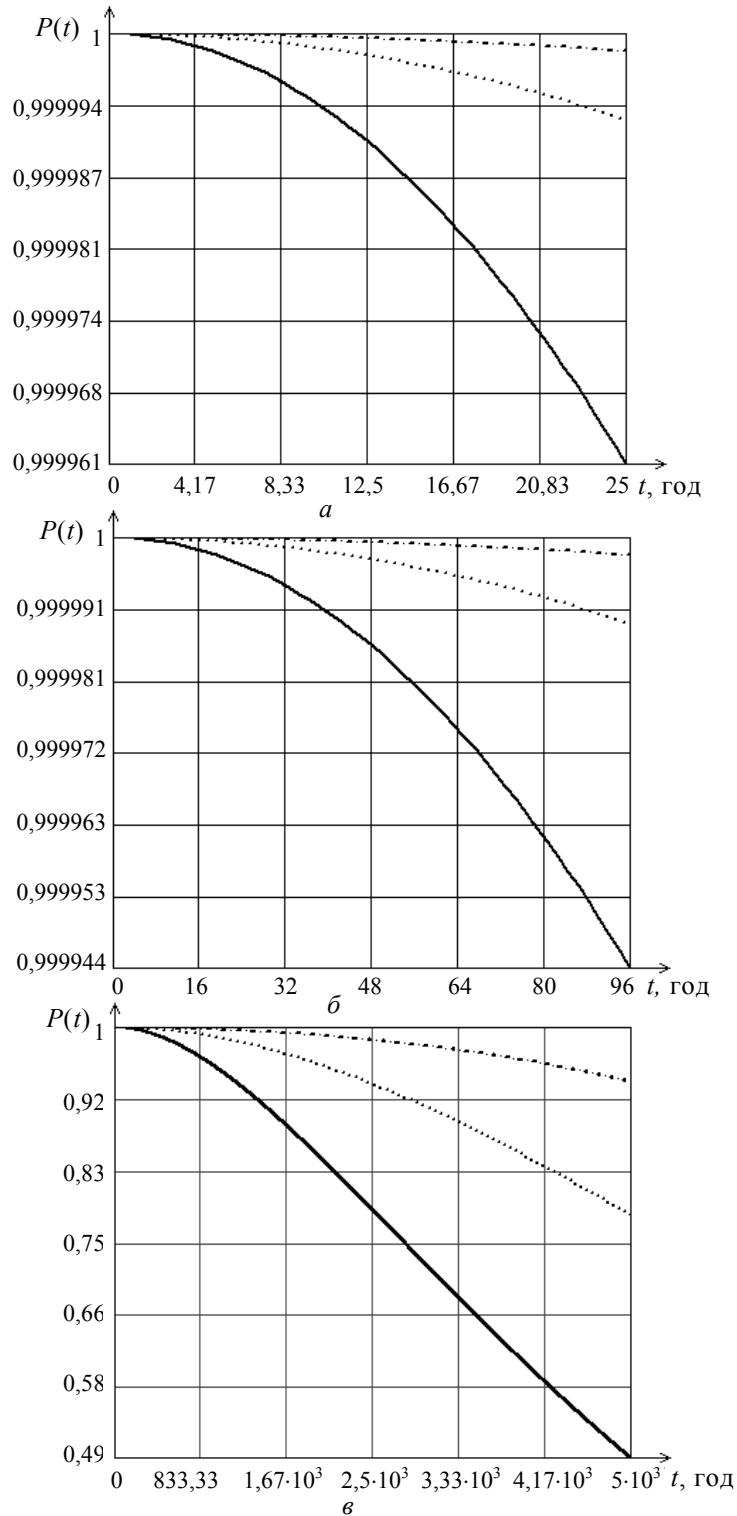


Рис. 4. Сім'ї залежностей ймовірностей безвідмовної роботи: а — для літака (25 год); б — для морського судна (96 год); в — для космічного апарата (5000 год)

Середнє напрацювання на відмову обчислювальних систем для розглянутих випадків буде розраховуватися за формулою

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (7)$$

Результати розрахунків, отримані за формулами (4)–(7), такі: $T_{P_1(t)} = 6000$ год, $T_{P_2(t)} = 10127$ год, $T_{P_3(t)} = 14444$ год.

ВИСНОВКИ

У результаті дослідження розглянуто різні варіанти реалізацій внутрішньої структури БЦОС класу ІМА. У варіанті виконання, коли система розділена на дві підсистеми, кожна з якої складається з ММП і 4 ФМ, для справного стану обчислювача необхідно, щоб усі модулі однієї підсистеми були працездатні. У разі відмови хоча б одного ФМ уся підсистема вважається несправною. Для такої системи середнє напрацювання на відмову становитиме 6000 год за λ -характеристики ФМ на рівні $50 \cdot 10^{-6}$ 1/год.

У варіанті виконання, коли в системі наявні 4 різновиди ФМ, кожен з яких резервується одним модулем такого ж типу, і 2 модулі ММП, один з яких перебуває в резерві, для виходу з ладу системи необхідно, щоб відмовили або одночасно 2 ММП, або два ФМ одного типу. Середнє напрацювання на відмову для такого випадку за λ -характеристики ФМ на рівні $50 \cdot 10^{-6}$ 1/год становитиме 10127 год.

У варіанті виконання, коли в системі наявні 8 ФМ і 2 ММП, і для роботи обчислювача досить 4 ФМ і 1 ММП, а в резерві є один ММП і 4 ФМ, середнє напрацювання на відмову за λ -характеристиці ФМ на рівні $50 \cdot 10^{-6}$ 1/год становитиме 14444 год.

Таким чином, розрахунки показали, що найбільш надійним з розглянутих варіантів є варіант виконання внутрішньої структури апаратури ІМА за схемою, зображеною на рис. 2, в.

Установлено, що для обчислювальних систем четвертого покоління використовувався послідовний принцип побудови алгоритму контролю. Показано, що для перспективних повітряних суден доцільно використовувати паралельний принцип контролю.

Запропоновано алгоритм контролю повітряного судна ІМА під час польоту. З'ясовано, що для перспективних повітряних суден слід використовувати режим «зовнішнього» ініціювання контролю з упровадженням принципу мажорювання результатів контролю функціональних елементів. Оцінено ймовірність безвідмовної роботи для трьох способів організації внутрішньої структури повітряного судна ІМА, актуальних для авіаційної промисловості.

ЛІТЕРАТУРА

1. V. Bogatyrev, "On the distribution of functional resources in fault-tolerant multi-machine computing systems", *Pribory i Sistemy. Management, control, diagnostics*, no. 12, pp. 1–5, 2001.
2. O. Kucher and P. Vlasenko, "Comparative Analysis of Reliability and Efficiency Indicators in Foreign and National Aviation", *Knowledge-based Technology*, iss. 2, pp. 11–19, 2009.

3. B. Vidin, I. Zharinov, and O. Zharinov, "Decomposition methods in the problems of distribution of computing resources of multi-machine complexes of on-board avionics", *Information and Control Systems*, no. 1, pp. 2–5, 2010.
4. Yu. Gatchin and I. Zharinov, *Fundamentals of designing computing systems for integrated modular avionics*. Moscow, 2010.
5. Yu. Gatchin, "Models and design methods for integrated modular avionics", *Bulletin of computer and information technologies*, no. 1, pp. 12–20, 2010.
6. O. Zharinov, B. Vidin, and R. Sheklovsepyants, "Principles of constructing a crate for an onboard multiprocessor computing system for fifth generation avionics", *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, no. 4, pp. 21–27, 2010.
7. Yu. Gatchin, I. Zharinov, and O. Zharinov, "Architecture of software for an automated workplace for a developer of onboard aircraft equipment", *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*, no. 2, pp. 140–141, 2012.
8. O. Zakharova, "Algorithms and software for testing onboard digital computing systems of integrated modular avionics", *Information and Control Systems*, no. 3, pp. 19–29, 2014.
9. E. Kniga, "Principles of organizing the architecture of advanced onboard digital computing systems in avionics", *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*, no. 2, pp. 163–165, 2013.
10. N. Koporskiy, B. Vidin, and I. Zharinov, "Organization of a computing process in a multi-machine on-board computer complex", *Izvestiya vuzov. Instrument making*, vol. 49, no. 6, pp. 41–50, 2006.
11. O. Kuznetsova, "Evaluation of the reliability of structurally redundant avionics complexes taking into account the average time between failures", *Izvestiya vuzov. Instrument making*, vol. 55, no. 3, pp. 65–69, 2012.
12. P. Paramonov, "Principles of building a sectoral system of computer-aided design in aviation instrumentation", *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*, no. 6, pp. 111–117, 2012.
13. P. Paramonov and I. Zharinov, "Integrated onboard computing systems: a review of the current state and analysis of development prospects in aviation instrumentation", *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, no. 2, pp. 1–17, 2013.
14. Yu. Sabo and I. Zharinov, "Criterion of similarity of design solutions to the requirements of technical specifications in avionics", *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*, no. 3, pp. 57–63, 2010.
15. V. Bogatyrev, "Reliability and efficiency of redundancy of computer networks", *Information technologies*, no. 9, pp. 25–30, 2006.
16. V. Bogatyrev, "Optimal redundancy of the system of heterogeneous servers", *Devices and systems. Management, control, diagnostics*, no. 12, pp. 30–36, 2007.
17. V. Bogatyrev and S. Bogatyrev, "Combining redundant servers into clusters of a highly reliable computer system", *Information Technologies*, no. 6, pp. 41–47, 2009.
18. I. Kozlyuk and Y. Kovalenko, "Functional bases of the software development and operation in avionics", *Problems of Informatization and Management*, no. 63, pp. 49–63, 2020.
19. Y. Kovalenko and I. Kozlyuk, "Implementation of the integrated modular avionics application development complex according to the ARINC653 standard", *The Bulletin of Zaporizhzhia National University. Physical and mathematical Sciences*, no. 2, 2020.

Надійшла 05.02.2021

INFORMATION ON THE ARTICLE

Iryna O. Kozlyuk, ORCID: 0000-0001-8239-8937, National Aviation University, Ukraine, e-mail: avia_ira@ukr.net

Yuliia B. Kovalenko, ORCID: 0000-0002-6714-4258, National Aviation University, Ukraine, e-mail: yleejulee22@gmail.com

НАДЕЖНОСТЬ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР ИНТЕГРИРОВАННОЙ МОДУЛЬНОЙ АВИОНИКИ ДЛЯ КОНФИГУРАЦИЙ АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ / И.А. Козлюк, Ю.Б. Коваленко

Аннотация. Рассмотрена проблема создания перспективных вычислительных систем в классе структур интегрированной модульной авионики (ИМА). Предложена унифицированная топология внутренней сети компьютера на основе каналов обмена SpaceWire и варианты ее исполнения для различных бортовых приложений. Введены схемы эквивалентной надежности каждой из частных структур и проанализированы возможности безаварийной работы каждой структуры. Приведены семейства графических зависимостей. Дан анализ существующих принципов и алгоритмов организации тестирования многопроцессорных мультимодульных бортовых цифровых вычислительных систем, предложен новый алгоритм тестирования многопроцессорных систем, соответствующий стандартам проектирования программного обеспечения для изделий ИМА. Рассмотрена структура унифицированного автоматизированного рабочего места (АРМ) проверки функциональных модулей ИМА. Выявлены специфические требования к рабочим местам для тестирования интегрированной авионики: повышенный уровень контроля аппаратной составляющей продукции; возможность моделирования отказов отдельных компонентов авионики для проверки режима реконфигурации компьютерной системы; модульное построение программного обеспечения с делением проверочных тестов на компоненты, выполняемые на уровне каждого конструктивно-функционального модуля и компьютера в целом в однозадачном и многозадачном режимах; открытость архитектуры рабочего места (АРМ), что обеспечивает возможность изменения уровня сложности управления продуктом и настройки одного класса сложности; внутрипроектная унификация как аппаратного, так и программного обеспечения АРМ проверки.

Ключевые слова: интегрированная модульная авионика, вычислительные системы, оценка показателей надежности, вероятность безотказной работы.

RELIABILITY OF COMPUTER STRUCTURES OF INTEGRATED MODULAR AVIONICS FOR HARDWARE CONFIGURATIONS / I.O. Kozlyuk, Y.B. Kovalenko

Abstract. The problem of designing advanced computing systems in the class of structures of integrated modular avionics is considered. The unified topology of the internal network of the computer on the basis of Space Wire exchange channels and variants of its execution for various onboard applications is offered. Equivalent reliability schemes of each of the specific structures are introduced and the probabilities of trouble-free operation of each structure are analyzed. Families of graphic dependencies are given. The analysis of the existing principles and algorithms for testing multiprocessor multimodal onboard digital computer systems is given; the new testing algorithm for the multiprocessor systems which follows the software design standards for products of integrated modular avionics is offered. The structure of the unified automated workplace for checking the functional modules of integrated modular avionics is considered. Specific requirements inherent in the workplaces for testing integrated avionics are identified: an increased level of control of the hardware component of products; the ability to simulate the failure state of individual components of avionics to check the mode of reconfiguration of the computer system; modular construction of software with the division of verification tests into components performed at the level of each CPM and the computer as a whole in single-task and multitasking modes; openness of architecture of a workplace, which provides an ability to change the level of control complexity of a product and control of one class of complexity; intra-project unification of both hardware and software of the workstation of the inspection.

Keywords: integrated modular avionics, computer systems, evaluation of reliability indicators, probability of trouble-free operation.