

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ  
КАФЕДРА АВІОНІКИ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ  
Завідувач випускової кафедри  
\_\_\_\_\_ Ю.В. Грищенко  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)  
ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВР  
ЗА СПЕЦІАЛЬНІСТЮ 173 «АВІОНІКА»

Тема: «Алгоритми контролю бортових обчислювачів інтегральної  
модульної авіоніки»

Виконавець \_\_\_\_\_ студент гр. АВ-452Б Костюк Віталій Владиславович  
(студент, група, прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник \_\_\_\_\_ д.т.н., професор Єнчев Сергій Васильович  
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

Нормоконтролер: \_\_\_\_\_ В.В. Левківський  
(підпис) (ПІБ)

КИЇВ 2024

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіоніки

Спеціальність 173 «Авіоніка»

(шифр, найменування)

Освітньо-професійна програма «Комплекси пілотажно-навігаційного обладнання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ю.В. Грищенко

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

## ЗАВДАННЯ

**на виконання кваліфікаційної роботи**

Костюка Віталія Владиславовича

(П.І.Б. випускника)

1. Тема роботи (проекту) «Алгоритми контролю бортових обчислювачів інтегральної модульної авіоніки» затверджена наказом ректора від «03» березня 2024 р. № 355/ст.
2. Термін виконання роботи (проекту): з 13 травня 2024 р. по 16 червня 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи (проекту): вимірювані величини – тип побудови авіоніки – ІМА; топологія та основні елементи бортової обчислювальної системи.
4. Зміст пояснювальної записки: Аналіз застосування технології ІМА при проектуванні бортових обчислювальних систем. Розробка алгоритмів контролю бортових обчислювачів інтегрованої модульної авіоніки
5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу:  
Архітектура комплексів бортового обладнання. Організації обчислювальних систем класу ІМА. Основні конструктивно-функціональні модулі ІМА. Розроблені в роботі алгоритми контролю

## 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін Виконання	Підпис керівника
1.	Вивчення інформаційних джерел	13.05 – 14.05.2024	
2.	Збір та аналіз даних інформаційного характеру. Обґрунтування вибору рішення щодо тематики дослідження	15.05 – 16.05.2024	
3.	Аналіз застосування технології ІМА при проектуванні бортових обчислювальних систем	17.05 – 22.05.2024	
4.	Розробка алгоритмів контролю бортових обчислювачів інтегрованої модульної авіоніки	23.05 – 31.05.2024	
5.	Перевірка на антиплагіат та отримання рецензії на диплом	01.06.2024	
6.	Оформлення та друк пояснювальної записки	04.06 – 05.06.2024	
7.	Підготовка презентації та доповіді	06.06 – 10.06.2024	

7. Дата видачі завдання: «13» травня 2024 р.

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_

(підпис керівника)

Єнчев С.В.

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_

(підпис випускника)

Костюк В.В.

(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Алгоритми контролю бортових обчислювачів інтегральної модульної авіоніки»: 54 с., 19 рис., 3 табл., 14 використаних джерел.

АЛГОРИТМ, КОНТРОЛЬ, ТЕСТ, АВІОНІКА, ОБЧИСЛЮВАЧ, АВТОМАТИЗОВАНЕ РОБОЧЕ МІСЦЕ.

*Об'єкт дослідження* - бортова цифрова обчислювальна система, що розробляється згідно з концепцією ІМА.

*Предмет дослідження* - методи та засоби контролю ОМ ІМА, що застосовуються під час польоту ЛА та під час виробництва ОМ та її функціональних елементів на заводі-виробнику.

*Мета роботи* - розробка засобів контролю ОМ ІМА, що забезпечують перевірку обчислювальної системи та функціональних елементів (модулів), що входять до неї, в процесі польоту ЛА і в процесі виробництва ОМ на заводі-виробнику.

*Методи дослідження:* методи теорії систем, методи системного аналізу та синтезу, методи математичного моделювання, методи теорії надійності, методи теорії ймовірностей та математичної статистики.

Матеріали роботи можуть бути використані при проектуванні засобів автоматизованого контролю авіоніки.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІМА ПРИ ПРОЕКТУВАННІ БОРТОВИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ .....	9
1.1. Архітектура комплексів бортового обладнання .....	9
1.2. Основи проектування виробів ІМА класу. Технічне рішення .....	12
1.3. Мережеві організації обчислювальних систем класу ІМА .....	15
1.4. Роль та місце БЦОС ІМА у складі сучасних комплексів .....	20
1.5. Постановка завдання створення засобів контролю обчислювальної системи класу ІМА та її компонентів .....	21
Висновки з першого розділу .....	23
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ КОНТРОЛЮ БОРТОВИХ ОБЧИСЛЮВАЧІВ ІНТЕГРОВАНОЇ МОДУЛЬНОЇ АВІОНІКИ .....	24
2.1. Призначення, внутрішня структура та принцип роботи конструктивно-функціональних модулів ІМА .....	24
2.2. Обчислювальні структури ІМА на основі базових конструктивно- функціональних елементів авіоніки .....	32
2.3. Принципи послідовної та паралельної перевірки функціонування мультиобчислювача .....	37
2.4. Алгоритм фонового контролю мультипроцесора ІМА .....	41
2.5. Принцип побудови автоматизованих робочих місць .....	44
Висновки з другого розділу .....	49
ВИСНОВКИ.....	51
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

## СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АРМ – автоматизоване робоче місце  
АЦП - аналого-цифровий перетворювач  
БОС – бортова обчислювальна система  
БІС - бортова інтерфейсна станція  
БЦОМ - бортова цифрова обчислювальна машина  
БЦОС - бортова цифрова обчислювальна система  
ОМ - обчислювальна система  
ЗБН – захищений бортовий накопичувач  
ІМА – інтегрована модульна авіоніка  
КВВ - канали введення-виведення  
КПЗД – контролер пам'яті загального доступу  
КЗЗ – комплекс засобів зв'язку  
КФМ - конструктивно-функціональний модуль  
МВ - модуль обчислювальний  
МВВ - модуль введення-виводу  
МКЮ - мультиплексний канал інформаційного обміну  
МПП – модуль постійної пам'яті  
МОІ А818 – модуль оптичних інтерфейсів ARINC818  
МСК – модуль мережевого комутатора AFDX  
МСУ - модуль сполучення універсальний  
МУПД – модуль універсального процесора даних  
НТД – нормативно-технічна документація  
ПЛІС - програмована логічна інтегральна схема  
ПМ – програмний модуль  
ПЗ - програмне забезпечення  
ФМ – функціональний модуль  
ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

## ВСТУП

*Актуальність.* На етапі розвитку авіаційна промисловість підходить до створення літального апарату (ЛА) нового покоління. Ключова роль у створенні ЛА нового покоління приділяється створенню нової універсальної обчислювальної системи (ОМ). Універсальна ОМ входить до складу ряду авіаційних комплексів (пілотажний, навігаційний та ін.), що керують рухом ЛА в польоті, і розробляється згідно з концепцією, що отримала назву «інтегрована модульна авіоніка» (ІМА), яка докладно викладена в групі стандартів ARINC 651-655.

Стандарти ARINC 651-655 регламентують порядок розробки компонентів апаратного та програмного забезпечення ОМ, з яких у подальшому будується універсальна ОМ для авіаційного застосування.

Реалізація запропонованих у стандартах ідей передбачає надання ОМ ІМА: - якісно нових експлуатаційних властивостей;

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

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

Прийняті у ОМ четвертого покоління технічні рішення у сфері організації засобів контролю виявляються непридатними до створення засобів контролю перспективних ОМ, у зв'язку з чим актуальною є завдання створення та дослідження методів і засобів контролю ОМ, спеціалізованих під ОМ ІМА.

*Об'єктом дослідження* кваліфікаційної роботи є бортова цифрова обчислювальна система, що розробляється згідно з концепцією ІМА.

*Предметом дослідження* кваліфікаційної роботи є методи та засоби контролю ОМ ІМА, що застосовуються під час польоту ЛА та під час виробництва ОМ та її функціональних елементів на заводі-виробнику.

*Мета роботи* полягає в розробці засобів контролю ОМ ІМА, що забезпечують перевірку обчислювальної системи та функціональних елементів (модулів), що входять до неї, в процесі польоту ЛА і в процесі виробництва ОМ на заводі-виробнику.

*Результати кваліфікаційної роботи.* У процесі виконання комплексних теоретичних та експериментальних досліджень вирішено актуальне науково-технічне завдання, що полягає у розробці алгоритмічного та програмного забезпечення засобів автоматичного та автоматизованого контролю перспективних ОМ ІМА та її функціональних компонентів. Основні науково-технічні результати:

1. Алгоритм контролю ОМ ІМА в польоті ЛА, який відрізняється від відомих: паралельним принципом організації контролю всіх функціональних елементів; запровадженням процедури багаторазового перехресного контролю кожного функціонального елемента; введенням процедури мажорювання результатів контролю кожного функціонального елемента ПС, що підвищують у сукупності достовірність контролю ОМ ІМА.

2. Алгоритми для контролю функціональних елементів ОМ 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 компонента, що тестується.

*Методи досліджень.* Результати, отримані в кваліфікаційній роботі, ґрунтуються на використанні методів теорії систем, методів системного аналізу та синтезу, методів математичного моделювання, методів теорії надійності, методів теорії ймовірностей та математичної статистики.



# РОЗДІЛ 1

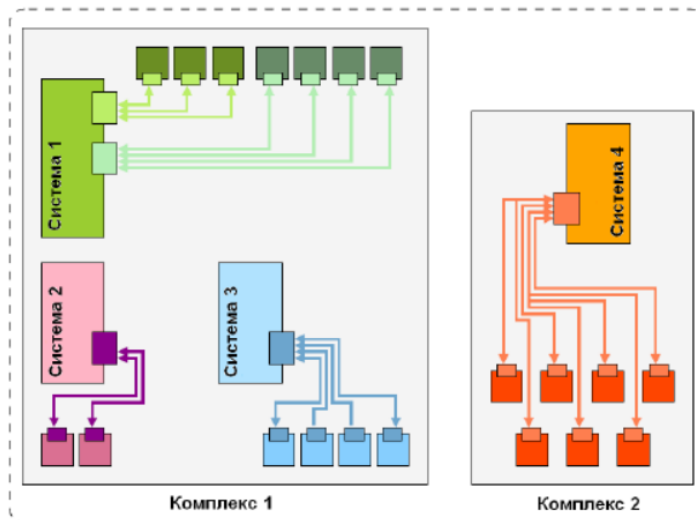
## ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ІМА ПРИ ПРОЕКТУВАННІ БОРТОВИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

### 1.1. Архітектура комплексів бортового обладнання

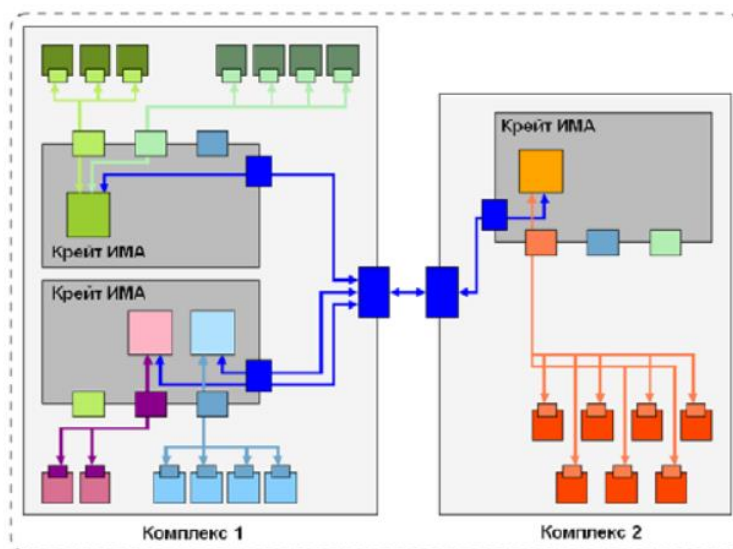
Бортові цифрові обчислювальні комплекси розпочали розвиток на рубежі 60 - х. Архітектура бортового комплексу будувалася за незалежним принципом (рис. 1.1, а): кожна система комплексу виконувала певну функцію авіоніки і була підключена до відповідних вимірювальних датчиків. При цьому жодного обміну між окремими системами комплексу передбачено не було. Типовими представниками такої організації архітектури обчислювальної системи є ЦВМ-263, що входять до її складу, і ЦВМ-264.

Подальший розвиток бортових цифрових авіаційних комплексів розвивався у напрямі створення розподілених обчислювальних структур. Сьогодні прийнято виділяти два підходи до створення комплексів авіоніки: побудова федеративної та інтегрованої архітектури.

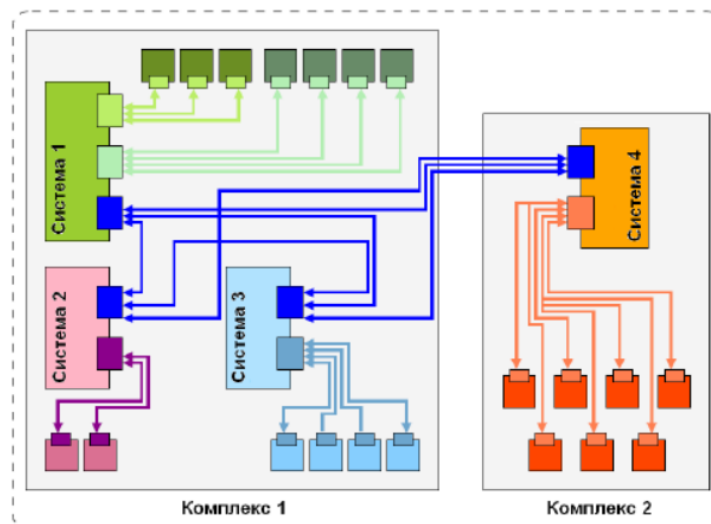
Федеративна архітектура бортових комплексів виникла на початку 80-х (рис. 1.1, б). Її головною відмінністю є автономний, незалежний розподіл функцій авіоніки між окремими підсистемами. При цьому визначено відносини між системами та виділеними для неї ресурсами. Кожна функція бортового комплексу реалізується підсистемою. Обмін між системами здійснюється за допомогою бортових ліній передачі інформації. Типовими представниками федеративної архітектури є обчислювальні машини та системи АР04, Piccolo та БЦВМ 90-50XXX, БЦВМ "Багет-53".



a



б



в

Рис.1.1. Приклади побудови авіоніки літальних апаратів:

- а) незалежне виконання архітектури; б) федеративне виконання архітектури;
- в) інтегроване модульне виконання архітектури

Основними недоліками федеративної архітектури є:

- неуніфіковані конструкторські рішення на окремі системи, що входять до складу блоків;
- програмне забезпечення нерозривно пов'язані з фізичним «втіленням» апаратури, закінченим продуктом є обчислювач із програмою;
- електронна компонентна база досить швидко “знімається” з виробництва та вимагає заміни та тривалого виготовлення виробу даного типу;
- системна інтеграція є унікальним процесом творчої діяльності головного конструктора, який важко автоматизувати;
- сертифікація системи є довгою та дорогою процедурою;
- стандартизацією охоплено лише загальносистемні інтерфейси та бортові лінії передачі інформації.

З початку 2000-х років архітектура бортових комплексів почала розвиватися відповідно до концепції інтегрованої модульної авіоніки. Приклади архітектури наведено на рис. 1.1, в. У підході ІМА функції бортового комплексу виділяються в логічні розділи, які можуть розташовуватися як в одному фізичному обчислювальному пристрої, так і кількох. Усі обчислювальні пристрої, з'єднані за допомогою високошвидкісних бортових інтерфейсів, є високоінтегрованими пристроями із загальним програмним рівнем, типовим специфікації ARINC 653 АРЕХ.

Основними принципами побудови інтегрованих обчислювальних систем є:

- модульна, відкрита, мікропроцесорно-незалежна архітектура БЦОС, що дозволяє нарощувати обчислювальні ресурси, поєднувати вироби різних виробників, виконаних у єдиному стандартному конструктивному виконанні;
- розподілена обробка сигналів та даних на основі багатопроцесорних обчислювальних засобів у розподіленій архітектурі обчислювальних систем, використання розподіленої мультизадачної операційної системи реального часу;
- використання високошвидкісних інформаційних каналів та інтерфейсів для міжсистемного, міжмодульного та внутрішньомодульного інформаційного обміну;

–використання технології розробки програмного забезпечення (ПЗ) з використанням сертифікованих мов програмування високого рівня;

–використання уніфікованих компонентів (модулів, вузлів) як конструктивно-змінних одиниць авіоніки, за рахунок чого підвищуються експлуатаційні властивості обчислювальної системи.

## **1.2. Основи проектування виробів ІМА класу. Технічне рішення**

Основні причини створення нових цифрових обчислювальних систем обумовлені бажанням розробників надати апаратурі нових експлуатаційних властивостей за рахунок:

– підвищення вимог до часу реакції виконавчих елементів авіоніки на вплив, координації дій льотного складу та елементів авіоніки, точності обчислення параметрів руху літальних апаратів;

– підвищення вимоги до інтелектуалізації ПЗ комплексів літального апарату;

– підвищення вимог до безпеки, регулярності та ефективності виконання польотів;

– підвищення вимог щодо надійності апаратури обчислювальних комплексів літального апарату;

– зниження вартості та оперативності технічного обслуговування у період експлуатації, а також відсутності необхідності технічного обслуговування у міжсервісні періоди.

Перспективний інтегрований комплекс бортового обладнання повинен відповідати вимогам щодо забезпечення всепогодного цілодобового застосування, забезпечення мінімального часу підготовки до роботи, забезпечення високих показників надійності, забезпечення вимог щодо простоти та зручності експлуатації та обслуговування, а також вимог щодо сертифікації.

Створення сучасних комплексів авіоніки здійснюється відповідно до концепції інтегрованої модульної авіоніки.

Основні експлуатаційні властивості комплексів ІМА досягаються за рахунок:

- відкритої мережевої розподіленої архітектури побудови бортового комплексу з можливістю нарощування обчислювальних ресурсів;
- магістрально-модульної ієрархічної структури обчислювача;
- мультифункціональності інтегрованої обчислювальної системи (ІОС);
- крейтово-модульного виконання;
- принципів стандартизації та уніфікації проектних рішень на апаратному та програмному рівні;
- відсутності необхідності обслуговування комплексу у міжсервісні періоди із збереженням необхідного рівня безпеки польотів та показників надійності апаратури;
- реалізації можливості автоматичної діагностики апаратури з наступною реконфігурацією структури обчислювальної системи при виявленні відмов у польоті.

Елементи обчислювальної системи, що створюється за принципами відкритої архітектури, слід проектувати з використанням стандартизованих та загальноприйнятих технічних рішень та системних напрацювань.

Мережева розподілена структура повинна бути пристосована до динамічного розподілу наявних ресурсів з метою збереження працездатності апаратури при можливих відмови обладнання та досягненні обчислювальної системи максимальної продуктивності. Така архітектура забезпечить можливість програмно-керованої реконфігурації апаратних засобів для надання необхідних функціональних характеристик авіаційної техніки з метою підвищення показників стійкості до відмови.

Важливою особливістю відкритої архітектури, властивої ІМА, є жорстко встановлених логічних зв'язків між елементами бортового устаткування (обчислювальними системами, датчиками, індикаторами). Це дозволяє реалізовувати обчислювальну структуру комплексу, що динамічно

реконфігурується, з перерозподілом завдань у межах доступних обчислювальних ресурсів.

Мультифункціональність обчислювальної системи ІМА означає можливість виконання великої кількості функцій обчислювальної системи ЛА на тих самих апаратних засобах. Таким чином, перехід від федеративної до інтегрованої архітектури забезпечує якісно новий рівень проектного рішення: перехід від ідеї «система – одна функція» до ідеї «багато функцій в одному обчислювальному ядрі». Реалізація ідеї "багато функцій в одному обчислювальному ядрі" дозволяє здійснити незалежне проектування програмних та апаратних платформ.

Крейтово-модульне стандартизоване виконання обчислювальної системи реалізується практично шляхом побудови обчислювальної системи з урахуванням обмеженого набору уніфікованих компонентів. До таких компонентів можна віднести: базову конструкцію крейта, що несе, мінімально достатній набір уніфікованих і стандартизованих конструктивно-функціональних модулів і мезонів з високою продуктивністю.

Принцип стандартизації та уніфікації означає єдиний підхід до створення системних, схемотехнічних, програмних та конструктивно-технологічних рішень, що згодом призводить до спрощення модернізації складу бортового комплексу та можливості нарощування функціональних завдань авіоніки.

Організація обчислювальних систем ІМА дозволяє підвищити продуктивність та показники надійності апаратури, зокрема, час напрацювання на відмову. Це досягається шляхом побудови ефективної організації обчислювальних процесів у розподіленому обчислювальному середовищі за рахунок реалізації:

- апаратних складових комплексу у вигляді мінімального набору стандартизованих високопродуктивних конструктивно-функціональних модулів;
- операційної системи реального часу, що забезпечує розподіл програмних програм для вирішення функціональних завдань;
- високошвидкісних мережних каналів інформаційного обміну, що забезпечують необхідну пропускну здатність та стійкість до відмови системи.

Сучасний авіаційний комплекс ЛА являє собою сукупність систем, що реалізують на борту різні завдання з управління ЛА, і включає (рис. 1.2):

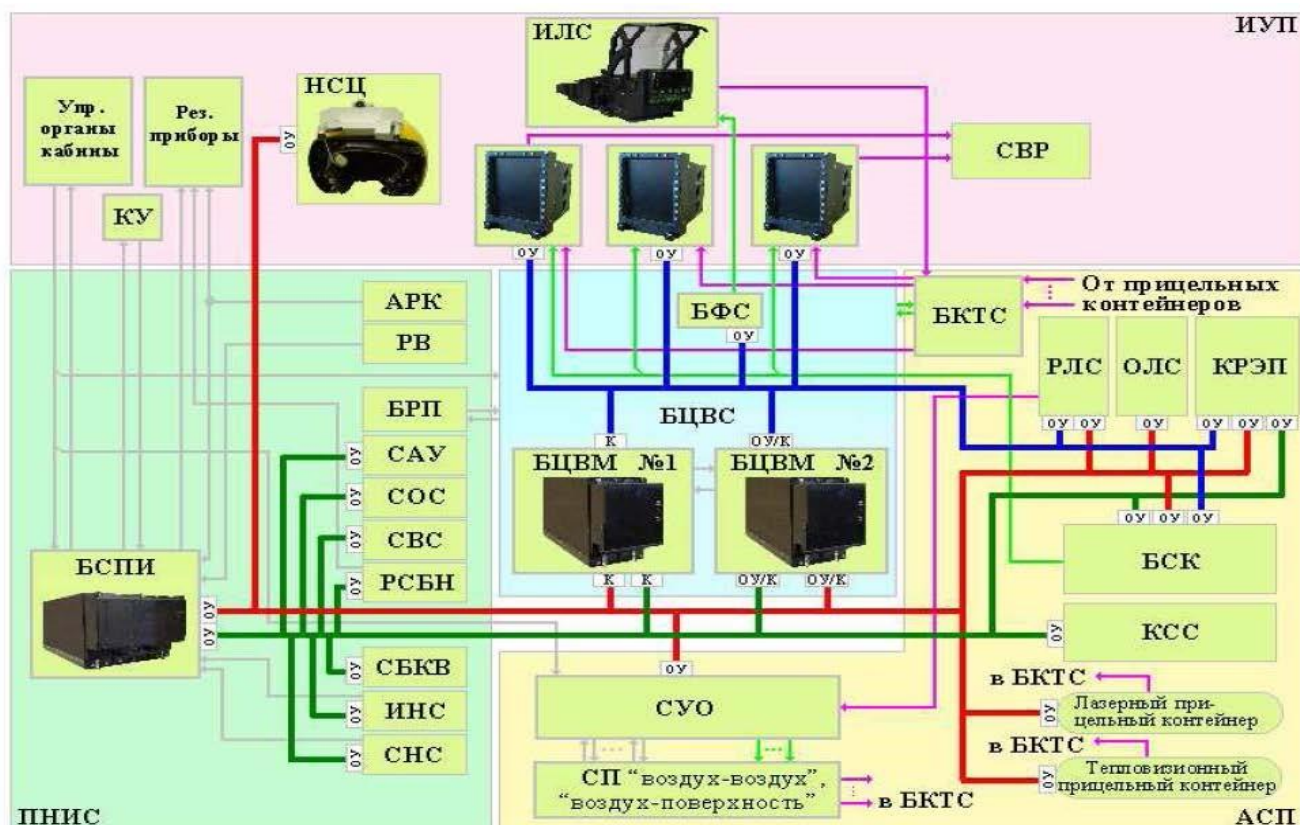


Рис.1.2. Структурно-функціональна схема типового БРЕО

- інформаційно-керівне поле (керівні органи кабіни, нашлемна система цілевказівки та індикації, індикатор лобового скла (коліматорні, ширококутні), багатофункціональні індикатори, пульти управління, система відеореєстрації);
- бортову цифрову обчислювальну систему та блок формування сигналів;
- пілотажно-навігаційну інформаційну систему (автоматичний радіокомпас, радіовисотомір, система автоматичного керування, система повітряних сигналів, радіосистема ближньої та дальньої навігації, система безплатформного курсу та вертикалі, інерційно-навігаційна система, супутникова навігаційна система тощо).

### 1.3. Мережеві організації обчислювальних систем класу ІМА

Мережева організація обчислювальних систем класу ІМА повинна відповідати таким вимогам [3]:

- топологія обчислювальної мережі має використовувати відкриті стандарти на апаратне та програмне забезпечення;
- топологія обчислювальної мережі БЦОС має бути масштабованою;
- топологія обчислювальної мережі БЦОС має підтримувати високий рівень взаємопов'язаності;
- мережеві вимоги не повинні вводити розширення номенклатури типів конструктивно-функціональних модулів (КФМ), що використовуються;
- повинна забезпечуватись повна взаємозамінність КФМ по кріпильно-посадковим місцям, способу встановлення та функцій;
- топологія обчислювальної мережі БЦОС повинна підтримувати різні рівні захисту даних від випадкових збоїв;
- топологія обчислювальної мережі БЦОС має забезпечувати можливість зміни зміни системи з метою реалізації якості стійкості до відмови.

Серед безлічі можливих конфігурацій БЦОС розрізняють повнозв'язкові (коли кожен з абонентів мережі безпосередньо пов'язаний з усіма іншими абонентами по окремих фізичних лініях зв'язку) та неповнозв'язкові мережі. З неповнозв'язкових змін розрізняють: комірчасту топологію, кільцеву топологію, зіркоподібну топологію та конфігурацію «загальна шина».

Відповідно до технічної документації МПВК призначений для багатоканальної цифрової обробки великих потоків інформації в реальному масштабі часу і може бути використаний як автономної бортової обчислювальної системи, так і для побудови кластерних суперЕОМ. До складу МПВК входять:

- до 8 модулів цифрових процесорних сигналів (МЦПС), що є двопроцесорними пристроями (один процесор встановлений на основній платі, другий – на додатковому мезонінному модулі);
- модуль центрального процесора (МЦП);
- об'єднувальна крос-плата міжмодульних з'єднань;
- модуль блоку живлення.



Для організації внутрішньосистемної взаємодії використовуються стандартний інтерфейс – системна шина CompactPCI (PICMG 2.0 D3.0) та спеціалізовані інтерфейси. Рівень внутрішньосистемної взаємодії представлений: на рис.1.3 зображено внутрішню структуру МПВК з внутрішніми зв'язками.

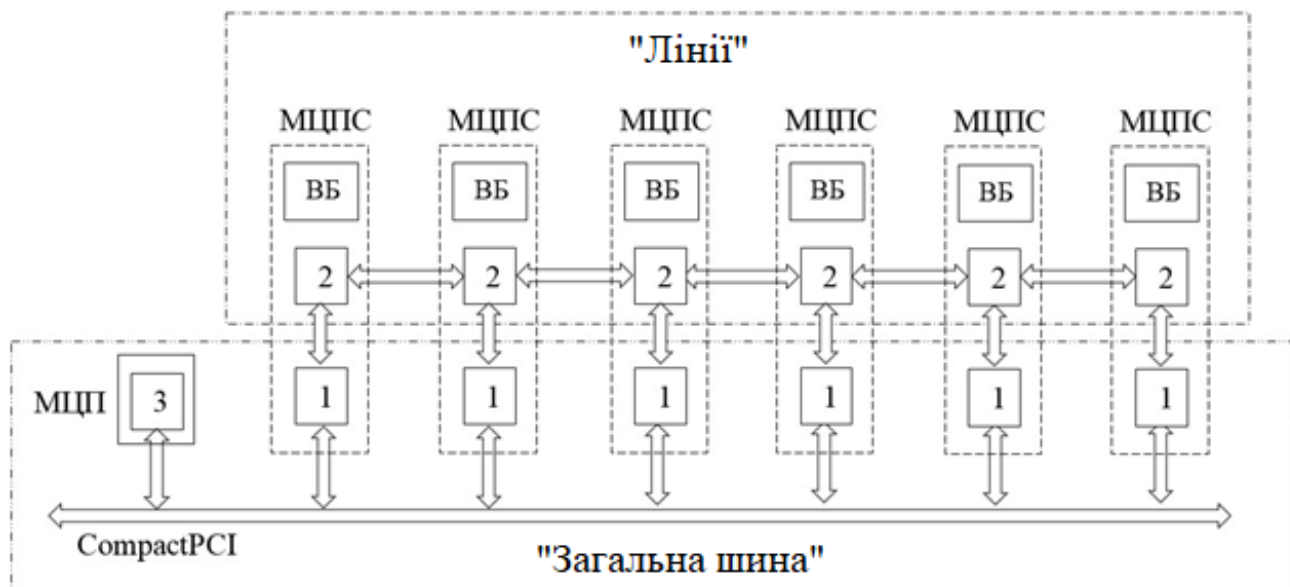


Рис.1.3. Мережева топологія МПВК:

- 1 - Контролер CompactPCI МЦПС;
- 2 - Контролер спеціалізованого інтерфейсу МЦПС;
- 3 - Контролер CompactPCI МЦП; ВБ – обчислювальний блок

Топологія внутрішньої мережі складається з топології типу лінія при з'єднанні контролерів спеціалізованого інтерфейсу модулів МЦПС і топології типу загальна шина, по якій з'єднуються всі контролери CompactPCI модулів МЦПС і модуля МЦП.

Проект «Базис 5.0» призначений застосування як уніфікованих базових апаратно-програмних засобів у комплексах бортового устаткування перспективних літаків різних типів. «Базис 5.0» складається з модуля універсального процесора даних (МУПД), модуля уніфікованого носія мезонінів (МНМ), модуля мережевого комутатора AFDX (МСК), модуля вторинних джерел електроживлення (МВЕ), модуля сполучення МУПД (МС МАРД) (МОІ А818), модуля сполучення універсальний (МСУ) та модуля сполучення МВЕ (МС МВЕ). Усі модулі з'єднані швидкодіючим розподіленим комутаційним середовищем PCI-Express.

Мережева топологія комплексу "Базис 5.0" представлена на рис. 1.4. Топологія відповідає стандартній мережевій топології типу "загальна шина".

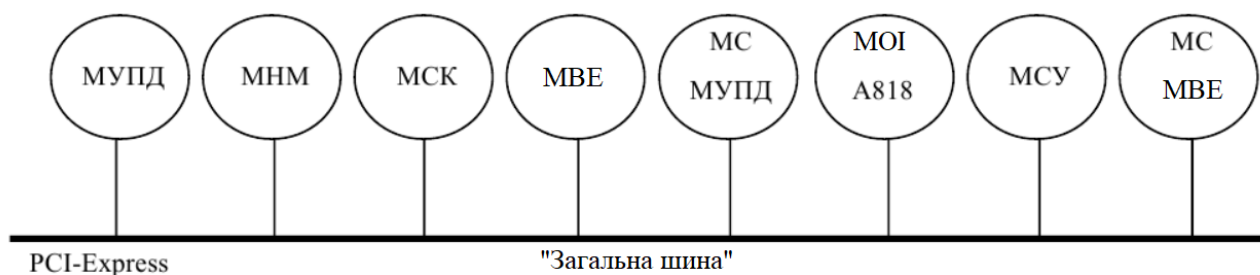
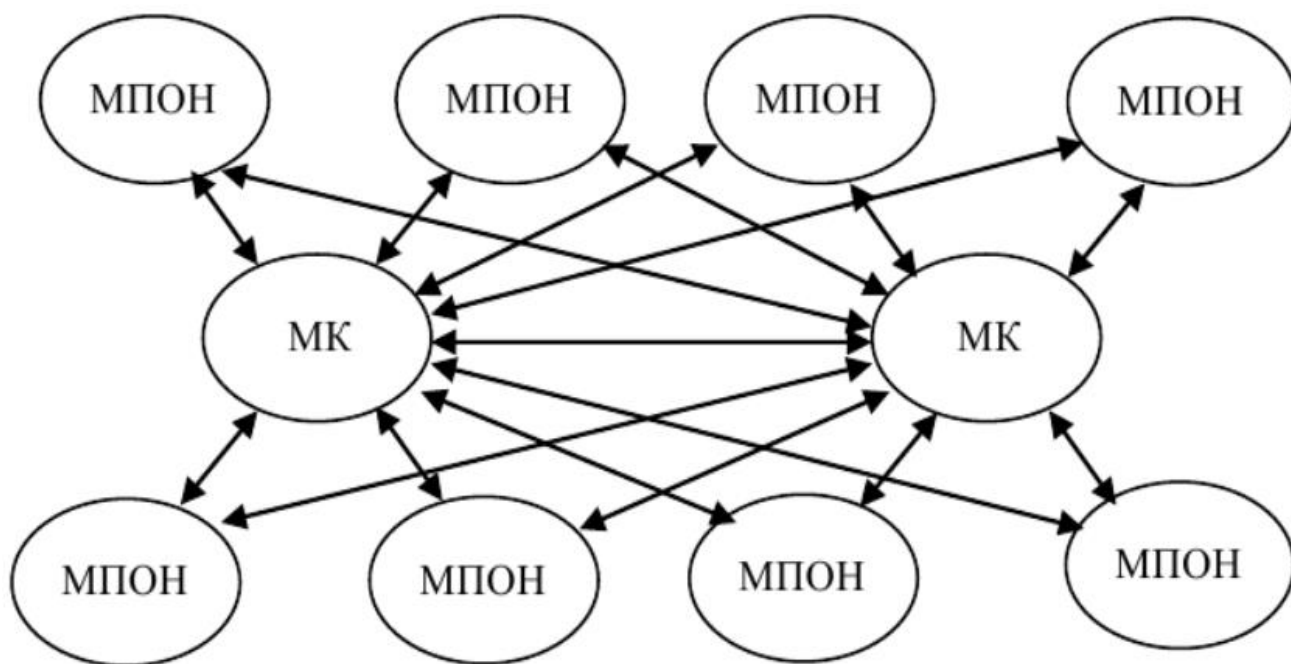


Рис.1.4. Мережева топологія комплексу «Базис 5.0»

Бортова обчислювальна система (БОС-1) призначена для реалізації функцій обчислювача та функцій управління у складі обчислювальних систем перспективних бортових комплексів військових та цивільних літальних апаратів. Мережева топологія даної системи є резервованою повнодуплексною мережею. В основі мережі лежить послідовний високошвидкісний інтерфейс, що забезпечує зв'язок модулів, що входять до її складу і зв'язок з іншими системами бортового обладнання. БОС-1 складається з модулів процесора загального призначення (МПОН) та модуля комутатора (МК). Архітектура системи є симетричною багатопроцесорною з дубльованим середовищем комутації каналів стандарту ARINC664. Топологія внутрішньої мережі БОС-1 зображена на рис. 1.5 і є топологією типу подвійна зірка.

Одним із шляхів практичної реалізації перспективних БЦОС є шлях побудови обчислювальних систем із застосуванням технології комутованих високошвидкісних інтерфейсів SpaceWire як внутрішньосистемний інтерфейс, а також як зовнішній інтерфейс для підключення мережеских абонентів у складі літального апарату.

БЦОС "Крейт" побудована на основі уніфікованих КФМ різного призначення. Структура БЦОС "Крейт" представлена на рис. 1.6.



"Подвійна зірка"

Рис.1.5. Мережева топологія системи БОС-1

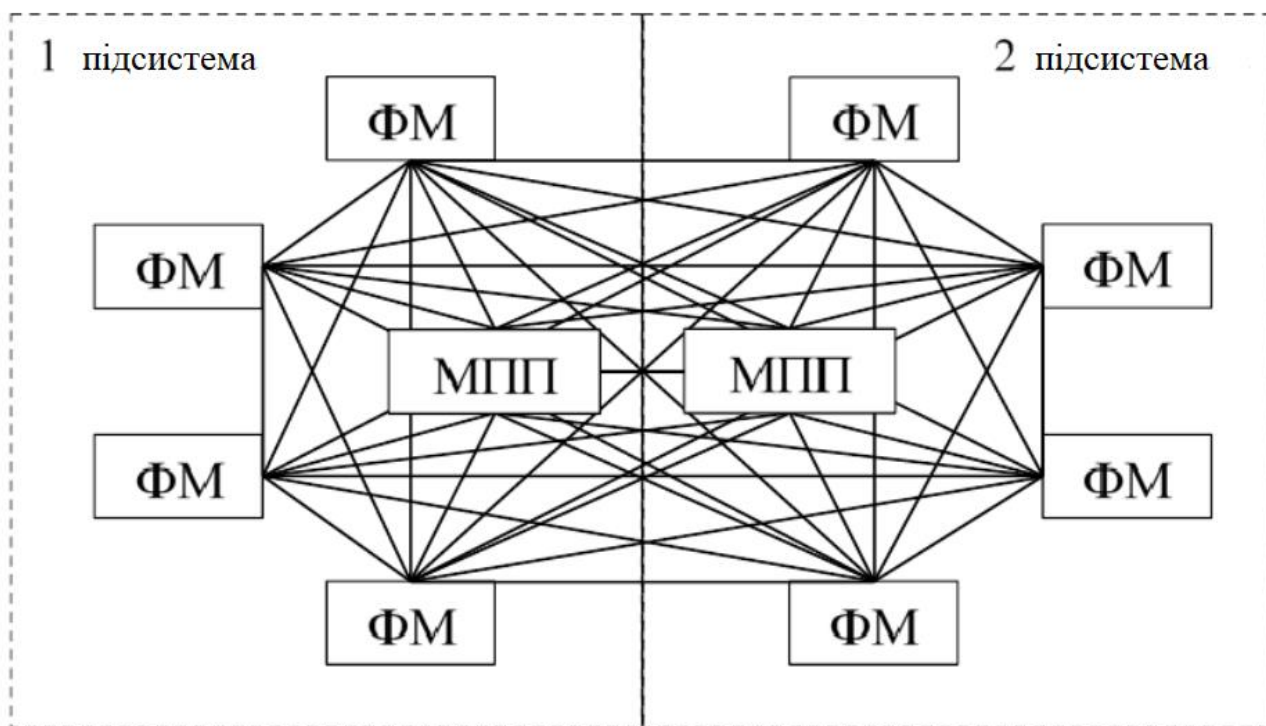


Рис. 1.6. Комбінаційна схема мережевої топології БЦОС «Крейт»: МПП – модуль постійної пам'яті; ФМ – функціональний модуль

В основу архітектури БЦОС покладено складові мережевої топології комутації модулів за схемою типу «подвійна зірка» та «повнозв'язкова мережа».

Мережева топологія системи Крейт, представлена на рис. 1.6 є змішаною топологією. З одного боку - це повнозв'язна мережа, оскільки всі модулі з'єднані між собою, але також тут присутні схемні рішення топології типу «подвійна зірка», оскільки всі КФМ з'єднані з двома модулями МПП, які забезпечують роботу комплексу в цілому (розподіляють завдання, контролюють стан справності компонентів тощо).

Поєднуючи в собі переваги обох мережевих рішень, система «Крейт»:

- підвищує надійність роботи автономного комплексу, дозволяючи не лише реалізувати ковзне резервування компонентів, а й перерозподіляти шляхи трафіку даних при виході з ладу сполучних зв'язків;
- забезпечує максимальну пропускну спроможність каналів завдяки підключенню всіх абонентів мережі за типом «крапка-крапка» через неблокуючий комутатор;
- забезпечує програмно кероване виконання функціональних завдань авіоніки, дозволяючи реалізовувати різні обчислювальні структури єдиної конструкції обчислювача. Це може бути організація розподілених обчислень або, наприклад, організація мажорювання даних, причому зміна функцій кожного модуля можлива безпосередньо під час польоту.

#### **1.4. Роль та місце БЦОС ІМА у складі сучасних комплексів**

В даний час обчислювальні системи, встановлені на борту ЛА, виконують такі основні функції авіоніки:

- автоматизоване та ручне літаководіння (планування польоту, навігація, керування в горизонтальній та вертикальній площинах та ін.);
- підготовка параметрів для відображення необхідної пілотам інформації на багатофункціональних індикаторах (навігаційна, метеорадіолокаційна, довідкова та ін.);
- контроль технічного стану загальнолітакних систем, а також реєстрація результатів контролю та ін.

Сучасні бортові комплекси складаються з низки підсистем, що з'єднуються відповідними бортовими інтерфейсами. У той же час сама система, що складається з набору КФМ, повинна мати свій внутрішній міжмодульний інтерфейс. У складі об'єктів перспективних ЛА розглядаються до впровадження такі види інтерфейсів:

- Fibre Channel (FC-AE-ASM);
- ARINC 818 (Avionics Digital Video Bus (ADV B));
- Avionics Full Duplex Switched Ethernet (ARINC664P7);
- послідовний код за ГОСТ 18977-79 та РТМ 1495-75 зі зм.2, 3, РК за ГОСТ 18977-79;
- мультиплексний канал інформаційного обміну за ГОСТ Р 52070;
- SpaceWire (ECSS-E-ST-50-12C).

#### **1.5. Постановка завдання створення засобів контролю обчислювальної системи класу ІМА та її компонентів**

Для перспективних ЛА необхідно розробляти нові методи та засоби контролю бортових комплексів класу ІМА та їх структурної організації, що дозволяють

підвищувати показники надійності, такі як напрацювання на відмову та достовірність контролю.

Для створення багатопроцесорних бортових обчислювальних систем, що реконфігуруються, з характеристиками, які будуть відповідати вимогам перспективних комплексів бортового обладнання, розробляються бортові системи, структура яких заснована на використанні уніфікованих функціональних модулів різного призначення, причому їх тип і кількість не повинні впливати на принципи організації обчислювальної системи та принципи її функціонування. При створенні засобів та методів контролю БЦОС класу ІМА необхідно використовувати принципи уніфікації та стандартизації, що базуються на внутрішніх функціональних вузлах компонентів БЦОС.

Роботи з проектування функціональних модулів для перспективних БЦОС ЛА в даний час ведуться за двома різними підходами до апаратної реалізації, які визначають внутрішню структуру функціональних модулів класу ІМА.

Згідно з першим підходом, вся структура КФМ складається з набору цифрових ПЛІС, які виконують всі функціональні завдання.

Обчислювальні модулі мають відкриту архітектуру, що масштабує, що дозволяє програмно реконфігурувати обчислювальну систему. Основу модулів складає елементи ПЛІС (залежно від модуля кількість варіюється від 16 до 64 шт.), які з'єднані швидкодіючими каналами зв'язку (LVDS, Ethernet та ін.). ЕРІ розташовані у вузлах плоскої сітки та з'єднані «прямокутною» системою зв'язків. При цьому з'єднуються сусідні елементи ПЛІС, а дані між несуміжними елементами ПЛІС передаються «транзитом» через проміжні елементи.

На основі базового модуля 16V5-75 може бути побудована обчислювальна система, що містить кілька базових модулів та запрограмована для вирішення функціонального завдання авіоніки.

Запропонована розробниками в модулі апаратна реалізація має очевидні переваги у вигляді високої швидкодії, малих габаритних розміток базових модулів, програмно-керовану реконфігурацію, що легко реалізується.

Разом з цим підхід на основі використання тільки ПЛІС має суттєві недоліки у вигляді великого енергоспоживання, що позначиться на значному збільшенні габаритних розмірів блоку у зв'язку з необхідністю введення складної системи охолодження, і у вигляді суттєвої залежності проектного рішення від імпоротної елементної бази, що використовується, оскільки вибір вітчизняних аналогів обмежений. Крім того, потрібна розробка складових проекту: нового програмного забезпечення, операційної системи, компіляторів та комплексів програмного забезпечення для програмування обчислювальної системи.

### **Висновки з першого розділу**

1. Для побудови перспективних цифрових бортових обчислювальних систем слід керуватися концепцією інтегрованої модульної авіоніки.
2. Для побудови модулів ІМА необхідно визначити номенклатуру обчислювальних модулів, а також схеми зв'язку та види інтерфейсів, що використовуються.
3. Для розробки обчислювальних модулів ІМА потрібна розробка схем перевірок та програмного забезпечення, спеціалізованих під виробу класу ІМА, як у процесі експлуатації на літальному апараті, так і в процесі виробництва на заводі-виробнику.
4. Уніфікація модулів ІМА дозволить побудувати автоматизоване робоче місце для перевірки виробів, що має підвищені показники уніфікації та стандартизації проектних рішень..

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ КОНТРОЛЮ БОРТОВИХ ОБЧИСЛЮВАЧІВ ІНТЕГРОВАНОЇ МОДУЛЬНОЇ АВІОНІКИ

#### 2.1. Призначення, внутрішня структура та принцип роботи конструктивно-функціональних модулів ІМА

##### 2.1.1. Модуль обчислювальний.

Модуль обчислювальний є набором апаратних засобів центрального процесора і призначений для розрахунку загальних і спеціальних алгоритмів управління рухом літального апарату в реальному масштабі часу і т.д. МО у складі БЦОС забезпечує [4, 5]:

- прийом від модуля масової пам'яті внутрішньої локальної мережі SpaceWire спеціалізованого програмного забезпечення, занесення отриманих даних в резидентний оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) та їх виконання на вбудованому обчислювальному вузлі;

- інформаційний обмін даними бортової локальної мережі ЛА з іншими абонентами комплексу авіоніки через інтерфейс сполучення, що забезпечується МК;

- надання функціонального програмного забезпечення (ФПЗ) програмних, апаратних та часових ресурсів для забезпечення можливості обробки отриманої інформації засобами ФПЗ;

- видачу підготовленої ФПО інформації до бортової мережі ЛА через технічні засоби MBV, МГ, МК.

Функціональна схема МО наведено на рис.2.1.

На основі МО можуть бути отримані інші за функціональним призначенням модулі шляхом додавання до конструкції МО плат-мезонінів та розширення вузла.

Принцип роботи МО полягає в наступному: при подачі електроживлення, модуль здійснює ініціалізацію компонентів, що входять до його складу (мікросхеми програмованої логіки, мікроконтролер, мікропроцесор та ін). Після



ініціалізації МО приймає з постійної пам'яті МПП функціональне програмне забезпечення БЦОС з внутрішньої локальної мережі SpaceWire і заносить його у внутрішню ОЗП. Подальша робота МО у складі БЦОС визначається алгоритмом функціонального програмного забезпечення, заданим розробником ПЗ для БЦОС.

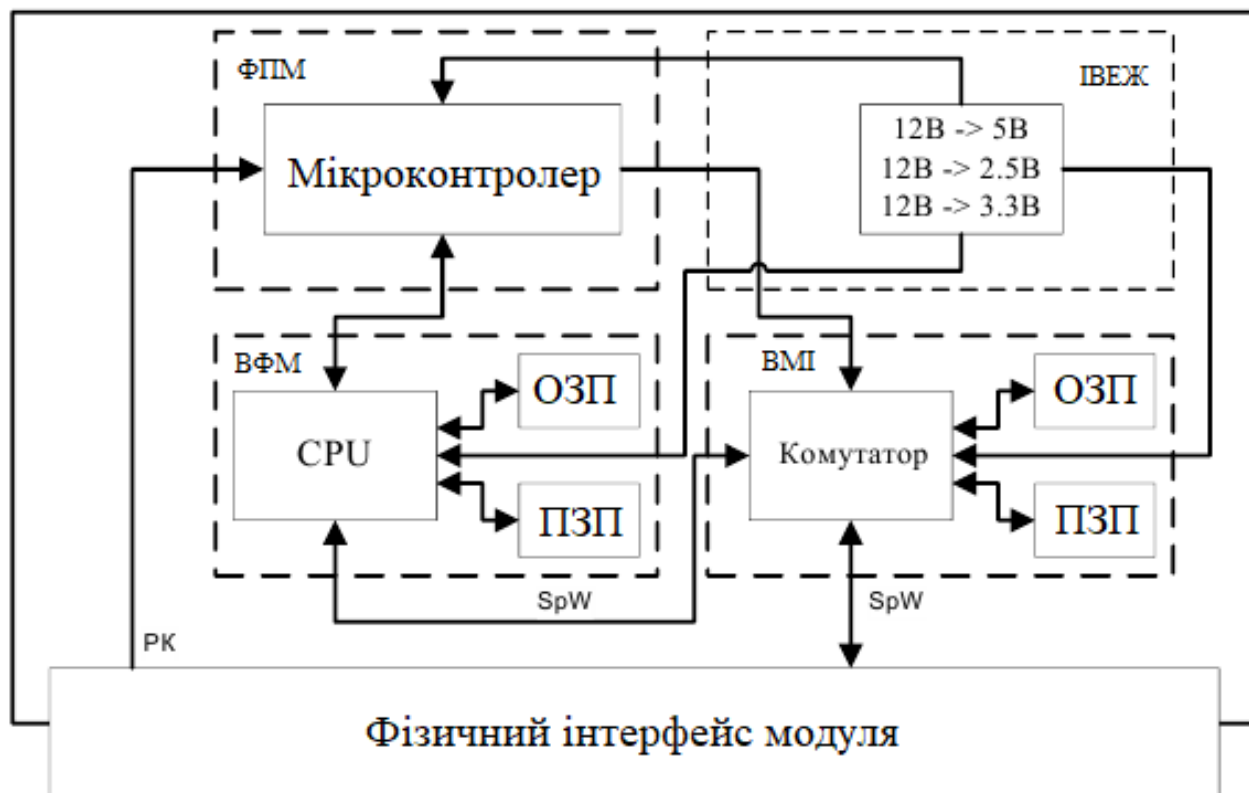


Рис. 2.1. Функціональна схема обчислювального модуля.

### 2.1.2. Модуль введення-виводу.

Модуль введення-виводу призначений для організації взаємодії абонентів на борту літального апарату один з одним по мультиплексним каналам інформаційного обміну за MIL-1553, послідовними каналами зв'язку та разовими командами по RTM 1495-7 та ARINC-429.

Функціональна схема модуля введення-виведення [4] представлена на рис. 2.2. Як видно із рис. 2.2, внутрішня структура модуля введення-виводу побудована на основі структури базового обчислювального модуля за винятком додаткового вузла ВЗМ, який необхідний для обміну інформацією з платами-мезонінами. Плати-мезоніни вводяться для забезпечення апаратно-програмної підтримки функцій введення-виведення даних за спеціалізованими бортовими інтерфейсами.

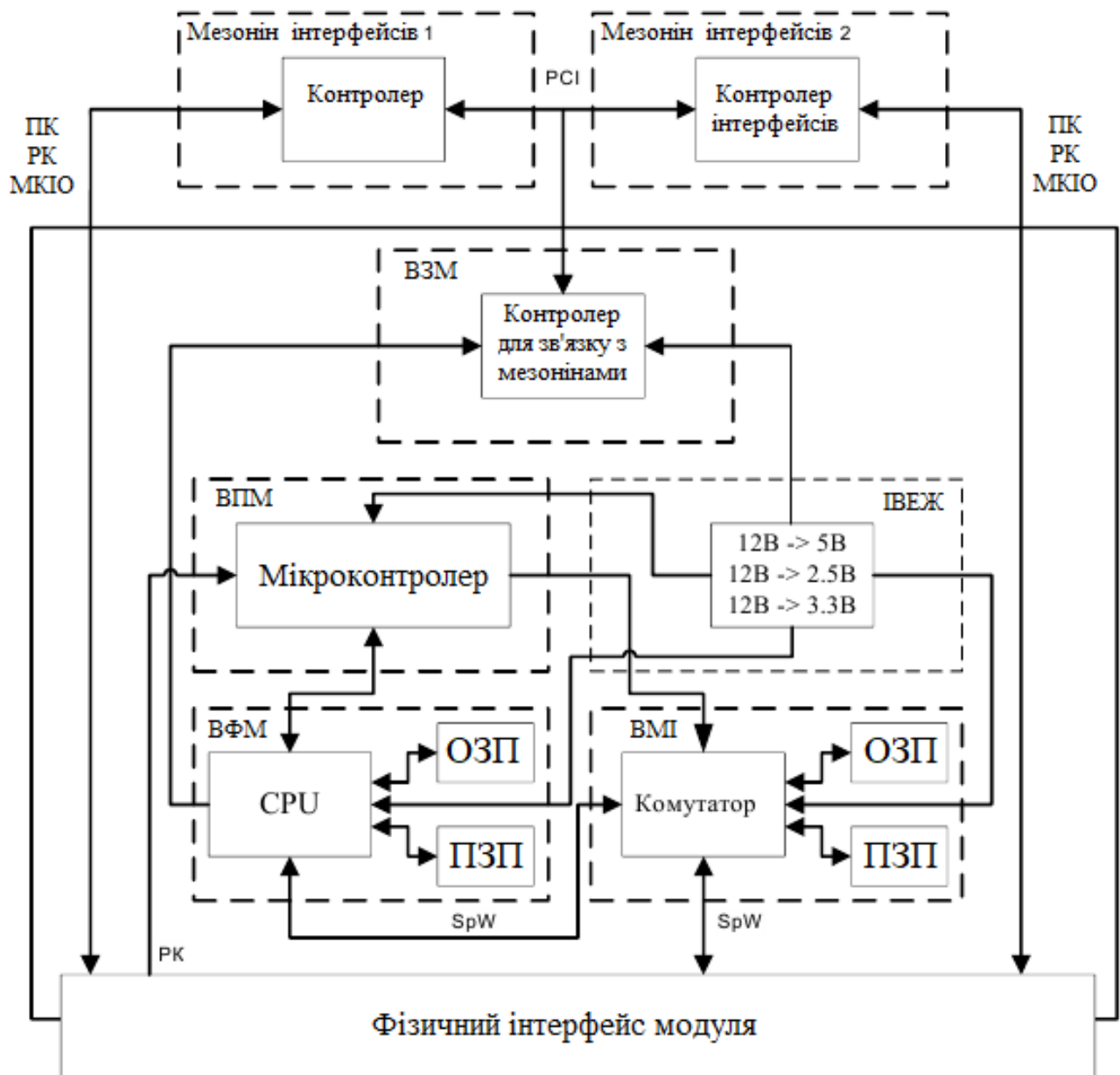


Рис. 2.2. Функціональна схема модуля введення-виведення.

Мезонінні плати є окремим пристроєм з контролером інтерфейсу для зв'язку з вузлом ВЗМ на платі-носії (в даному випадку для цієї мети використовується паралельний інтерфейс PCI 2.2). За цим інтерфейсом модуль надходять дані, необхідні для видачі абонентам БРЕО за спеціалізованими бортовими інтерфейсами. А також аналогічно в інший бік. Мезонін приймає інформацію за спеціалізованими бортовими інтерфейсами, перетворює її та видає на плату-носії.

Принцип роботи МВВ у складі БЦОС описується так: при включенні напруги електроживлення починається процес ініціалізації модуля, що включає

передвстановлення та запуск мікроконтролера, мікропроцесора, комутатора, а також елементів ПЛІС. Потім з МПП завантажується ФПЗ в ОЗП модуля MBV локальної мережі за інтерфейсом SpaceWire. Подальша робота модуля у складі БЦОС визначається алгоритмом функціонального програмного забезпечення, передбаченим розробником. В процесі функціонування БЦОС, коли модуль отримує дані по локальній мережі SpaceWire, модуль передає ці дані в ВЗМ, що забезпечує видачу даних по необхідному бортовому інтерфейсу через плати-мезоніни, на яких реалізовані програмно керовані контролери бортових інтерфейсів. Аналогічно, навпаки, MBV отримує дані за спеціалізованими бортовими інтерфейсами, перетворює їх і може передати будь-якому з модулів у складі обчислювальної системи за інтерфейсом локальної мережі.

### **2.1.3. Модуль графічний**

Модуль графічний призначений для організації прийому, обробки зовнішньої відеоінформації та формування вихідного відеосигналу на бортові засоби індикації інформаційно-керуючого поля кабіни пілота літального апарату. МГ у складі БЦОС забезпечує [4, 7]:

- виконання математичних операцій (переважно у полярній системі координат);
- виконання спеціалізованих перетворень даних для здійснення апаратно-програмної підтримки графічних функцій стандарту OpenGL;
- прийом та передачу відеоданих за цифровим оптичним інтерфейсом на основі технології Fibre Channel (стандарт ARINC-818);
- прийом та передачу даних за міжмодульним інтерфейсом БЦОС на основі технології SpaceWire.

Внутрішня структура МГ реалізована з урахуванням структури базового обчислювального модуля. На відміну від MBV, де вводяться додаткові мезоніни, що підтримують необхідні інтерфейси, МГ розширюється вузол ВФМ додаванням спеціалізованого графічного контролера, що підтримує функцію передачі

зображення за інтерфейсом Fibre Channel. Функціональна схема МГ представлена на рис.2.3.

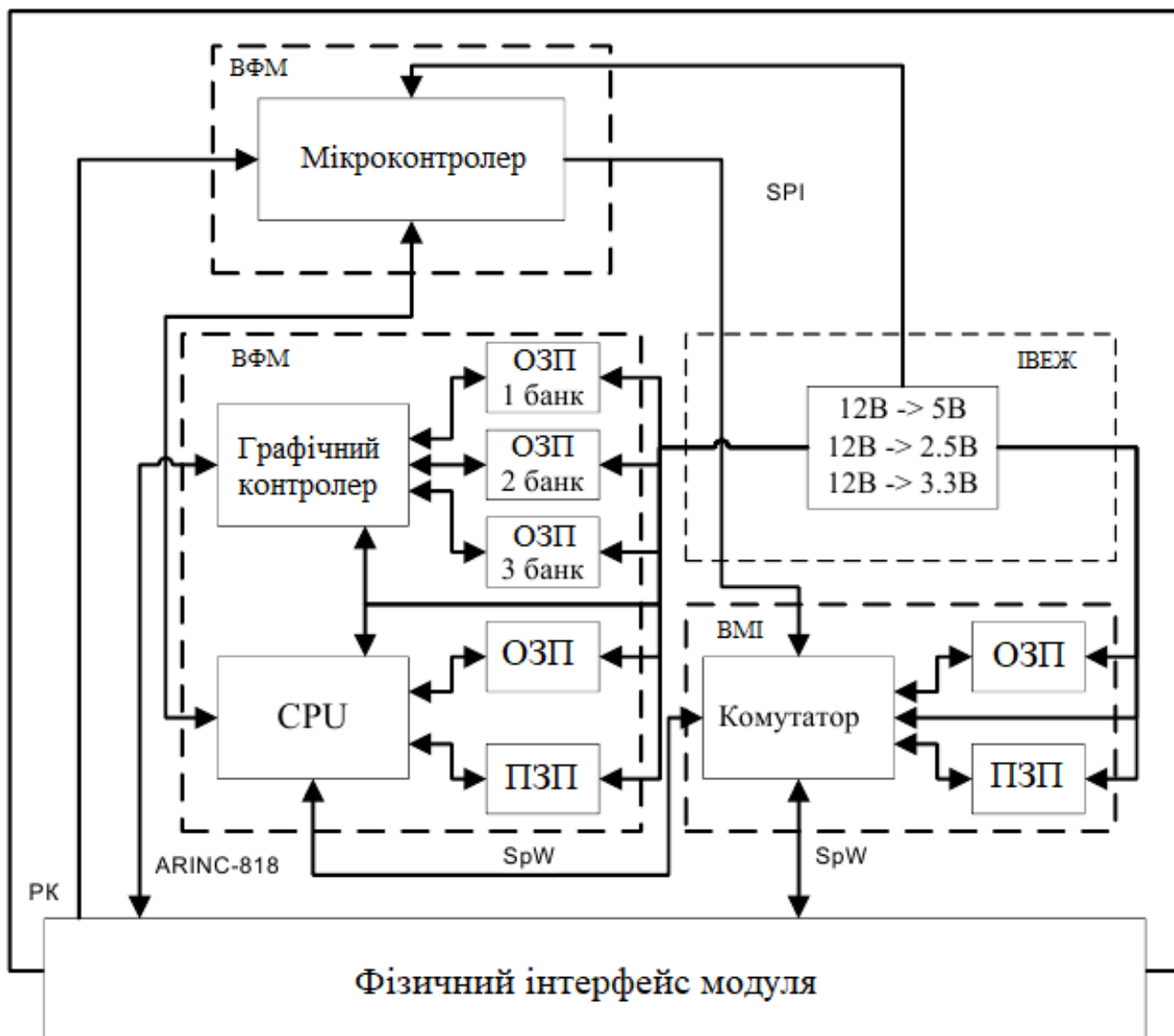


Рис. 2.3. Функціональна схема графічного модуля.

Принцип роботи МГ наступний. При подачі напруги електроживлення МГ здійснює ініціалізацію внутрішніх вузлів модуля. Потім по локальній мережі SpaceWire модуль отримує від МПП та заносить до ОЗП ФПЗ, алгоритмом якого визначається подальша робота модуля у складі БЦОС.

Зокрема, для нашлемної системи цілевказівки та індикації [7], що входить до складу БРЕО, МГ отримує відеозображення з камери огляду закабінного простору та пілотажно-навігаційну інформацію для побудови графічного зображення. Два зображення поєднуються у МГ з урахуванням заданого кутового положення ЛА. Для бортової цифрової картографічної системи [8] модуль формує відеозображення

геоінформаційних даних у поєднаному з пілотажно-навігаційною інформацією режимі. Відомі режими поєднання навігаційної та метеорадіолокаційної інформації.

Синтезоване в МГ зображення передається цифровим каналом обміну Fibre Channel на засоби індикації бортової системи відображення, що входить до складу інформаційно-керуючого поля кабіни пілота ЛА.

#### **2.1.4. Модуль-комутатор.**

Модуль-комутатор призначений для узгодження різноманітних видів інтерфейсів бортового обладнання авіоніки та міжмодульних інтерфейсів БЦОС. МК у складі БЦОС забезпечує [4, 5]:

- перетворення електричного сигналу в оптичний сигнал та оптичного сигналу в електричний сигнал інтерфейсу FC-AE-ASM;

- виконання функції оптико-електронного узгодження інтерфейсів SpaceWire та Fibre Channel (специфікація FC-AE-ASM);

- виконання функції комутації електричних сигналів бортової мережі ЛА на основі SpaceWire інтерфейсу з сигналами внутрішньої локальної мережі БЦОМ на основі SpaceWire.

Внутрішня структура МК реалізована за рахунок розширення вузла УФМ базового обчислювального модуля шляхом додавання до нього спеціалізованих елементів: приймачів та передавачів оптичного сигналу Fibre Channel та контролера інтерфейсу Fibre Channel. Функціональна схема модуля комутатора представлена на рис.2.4.

Принцип роботи МК наступний. При включенні напруги живлення відбувається ініціалізація всіх вузлів модуля. Потім локальної мережі SpaceWire МК отримує ФПЗ від модуля МПП і заносить їх у ОЗП. Подальша робота модуля у складі БЦОС визначається алгоритмом ФПЗ, передбаченим розробником ПЗ. Зокрема, у складі БГС, МК отримує телевізійне зображення із зовнішніх джерел (камери), передає до МГ, де реалізовано перетворення цього зображення та/або поєднання кадрів зображень графічної інформації, необхідної для пілота.

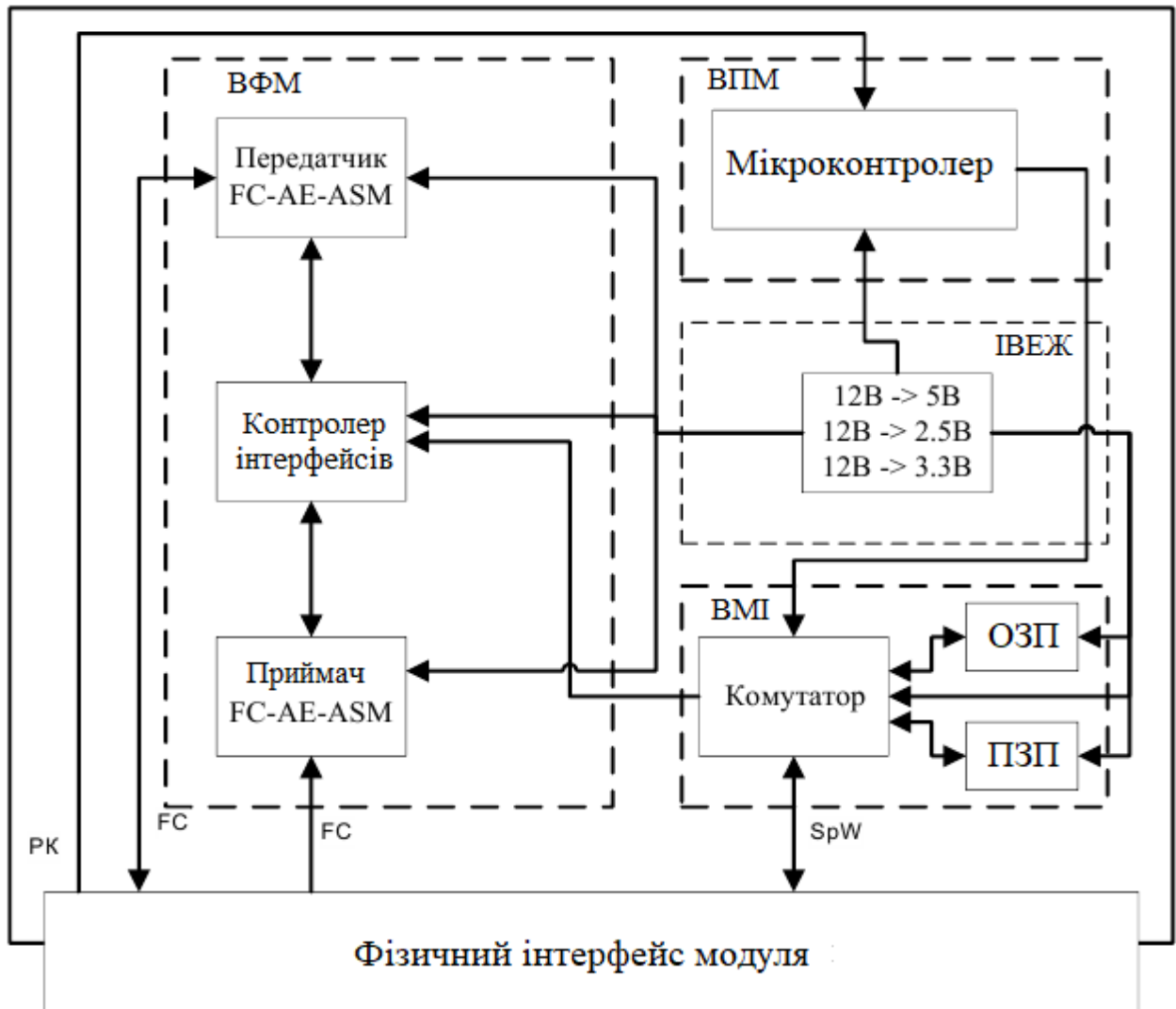


Рис. 2.4. Функціональна схема модуля-комутатора.

### 2.1.5. Модуль масової пам'яті.

Модуль масової пам'яті крім функцій зберігання даних в незалежній пам'яті, виконує роль арбітра у складі обчислювальної системи.

ММП як модуль пам'яті у складі БЦОС забезпечує [4, 6]:

- прийом інформації з бортової локальної мережі ЛА;
- зберігання в незалежній пам'яті даних;
- завантаження в резидентне ОЗП, встановлене на модулі, даних ФПЗ та їх виконання;
- видачу спеціалізованих компонентів ФПЗ з локальної мережі у відповідні КФМ;

- видачу сформованої засобами ФПО інформації з мережі інформаційного обміну абонентам бортового устаткування авіоніки.

ММП як арбітр обчислювальної системи забезпечує:

- контроль модулів, у тому числі складається обчислювальна система;
- ведення журналу, в котрий заносяться дані тестувань обчислювальної системи у процесі польоту;
- прийняття рішення про те, чи модуль відмовив, виходячи з результатів тестування;
- ухвалення рішення про необхідність реконфігурації.

Внутрішня структура ММП реалізована на основі структури базового обчислювального модуля і виходить шляхом додавання вузла ВЗМ для зв'язку зі спеціалізованими платами-мезонінами, необхідні розширення обсягу постійної пам'яті модуля, призначеної для зберігання ФПЗ. Функціональна схема ММП представлена на рис. 2.5 [4].

Мезонінні плати містять контролер інтерфейсу для обміну інформацією з платою-носієм (в даному випадку використовується паралельний інтерфейс РСІ 2.2), контролер для доступу до постійної пам'яті, встановленої на мезоніни, а також елементи пам'яті в кількості, необхідної для реалізації функцій авіоніки. Мезонін отримує дані від плати-носія та завантажує ці дані в енергонезалежну пам'ять. Відповідно до цільового призначення виробу дані завантажуються на етапі передпольотної підготовки, оскільки цими даними є програмне забезпечення, компоненти конфігурування радіоелементів програмованих логічних інтегральних схем і т.п.

Принцип роботи ММП є наступним. При включенні напруги електроживлення ММП ініціалізує компоненти, що входять до його складу. Потім ММП локальної мережі SpaceWire передає в ОЗП КФМ БЦОС функціональне програмне забезпечення. Далі ММП здійснює контроль стану справності модулів, аналізує дані вбудованого тестового контролю та при виявленні відмови та наявних у системі апаратних та програмних ресурсах виробляє реконфігурацію БЦОС,

перерозподіляючи функціональне програмне забезпечення між справними компонентами.

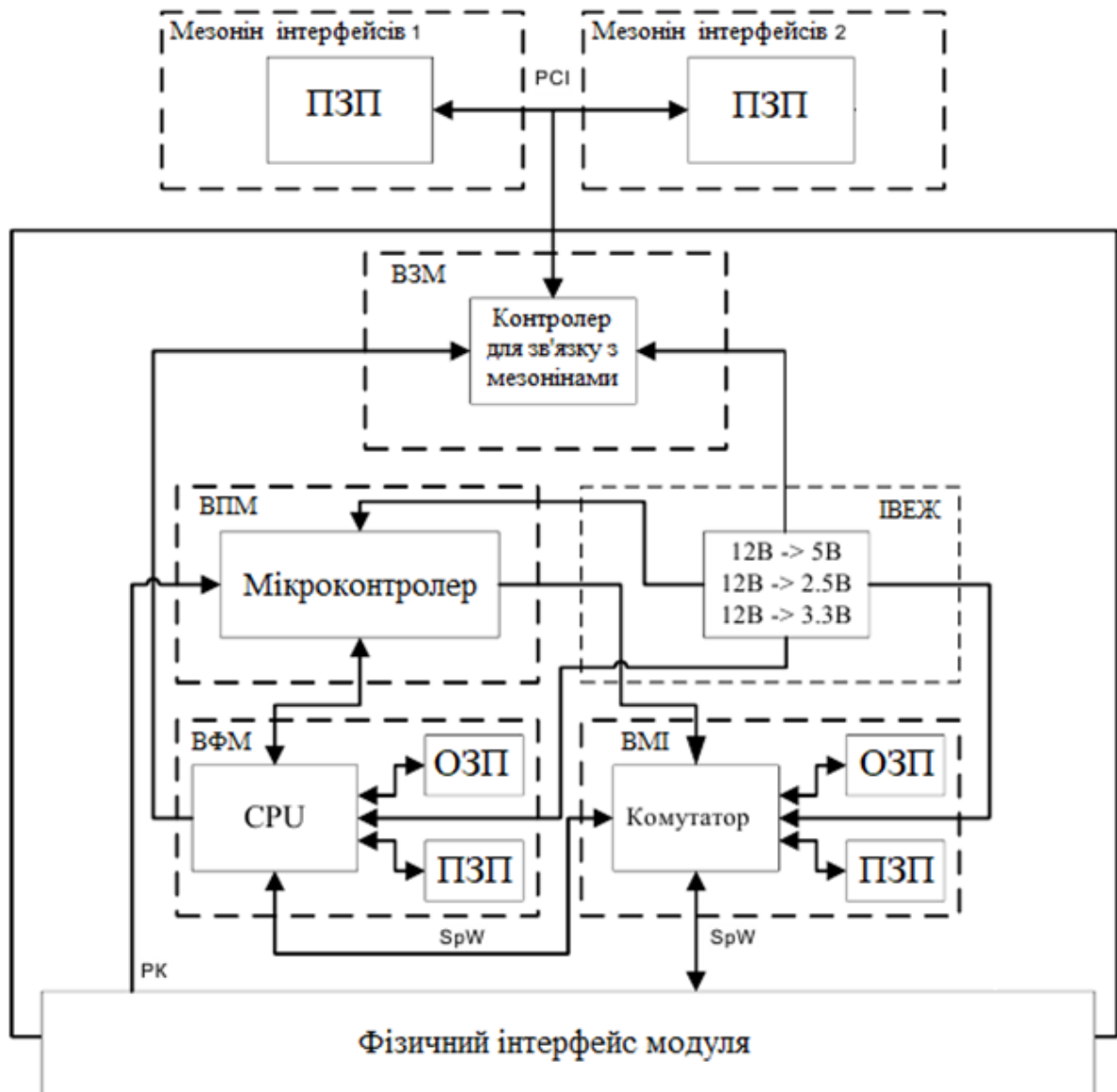


Рис. 2.5. Функціональна схема модуля масової пам'яті

## 2.2. Обчислювальні структури ІМА на основі базових конструктивно-функціональних елементів авіоніки

Представлені структури КФМ призначені для створення обчислювальних систем, що реконфігуруються, виконаних відповідно до рекомендацій групи стандартів ARINC-651-ARINC-655, що поширюються на бортову апаратуру класу інтегрованої модульної авіоніки. У процесі виконання за участю автора науково-



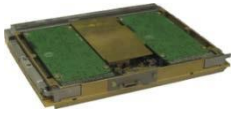




дослідних та дослідно-конструкторських робіт показано, що різні за функціональним призначенням КФМ можуть бути побудовані на основі внутрішньої структури базового обчислювального модуля:

- шляхом додавання спеціалізованих вузлів;
- шляхом розширення вузла функцій модуля;
- шляхом введення до складу модуля спеціалізованих плат-мезонінів, що реалізують конкретні функції авіоніки (реалізація спеціалізованих бортових інтерфейсів, додатковий обсяг пам'яті).

Технічні характеристики окремих представників різних сімейств КФМ наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики представників різних сімейств КФМ

Вид КФМ	Характеристики	Зовнішні інтерфейси	Конструктивне виконання	Напруга живлення,	маса, кг
 <p>МВ</p>	Продуктивність 600 MFLOPS	SpaceWire 10 шт. 400 Мбіт/с, 14 каналів	Захищений модуль типорозміру 6U за стандартом VITA 48.2	+12	1,5
 <p>МГ</p>	Продуктивність 6 GFLOPS	ARINC818 2 канали; SpaceWire 2 канали	Захищений модуль типорозміру 6U за стандартом VITA 48.2	+12	1,5
 <p>МВВ</p>	Продуктивність 600 MFLOPS	Вих. ПК - 10 шт.; Вх. ПК - 5 шт.; Вх. РК - 4 шт.; Вих. РК - 4 шт.; МКІО – 2 шт., резервовані; SpaceWire 10 шт. 400 Мбіт/с, 2 канали	Захищений модуль типорозміру 6U за стандартом VITA 48.2	+12, +5, ±6	1,5
 <p>ММП</p>	Продуктивність 6 GFLOPS, Пам'ять 1024 Мбайт	SpaceWire 10 шт. 400 Мбіт/с, 12 каналів	Захищений модуль типорозміру 6U за стандартом VITA 48.2	+12, +5	1,5
 <p>МН</p>	Перетворює напругу бортової мережі	Вихідна напруга живлення +6В, -6В, +12В, +5В	Захищений модуль типорозміру 6U за стандартом VITA 48.2	+27	2,5

Елементна база наведених у табл. 2.1 функціональних модулів, в основному, складається з ОЗП, постійного запам'ятовуючого пристрою (ПЗП), процесорів та контролерів, елементів ПЛІС.

Склад модулів та відповідність внутрішніх вузлів модулів вузлам базового модуля ілюструється табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Розподіл уніфікованих вузлів базового модуля КФМ

КФМ	ВФМ (CPU)	ВФМ (графіка)	ВФМ (інтерфейси)	ВПМ	ВМІ	ІВЕЖ	ВЗМ	Мезонін	
								пам'ять	інтерфейс
МВ	+	-	-	+	+	+	-	-	-
ММП	+	-	-	+	+	+	+	+	-
МГ	-	+	-	+	+	+	-	-	-
МВВ	-	-	+	+	+	+	-	-	+
МК	-	-	+	+	+	+	-	-	-

Як видно з таблиці, для різних за призначенням функціональних модулів основними компонентами внутрішньої структури є вузли ВПМ, ВМІ та ІВЕЖ. Вузол ВФМ є обов'язковим для кожного з модулів, але є кілька його різновидів: один для обчислювальних функцій (CPU), інший – для реалізації графічних функцій (графіка), третій – для реалізації інтерфейсних функцій (інтерфейси). Далі, залежно від наявності/відсутності мезонінних розширювачів функцій, у структурі містяться/відсутні вузол ВЗМ та мезоніни. Символом "+" відзначено наявність вузла в модулі, символом "-" відзначено відсутність вузла.

Аналіз даних табл. 2.1 та табл. 2.2 показує, що запропонована номенклатура КФМ є достатньою для створення сімейства обчислювачів, що покривають потреби авіаційної промисловості у створенні перспективних зразків бортового обладнання. У табл. 2.3 представлений помодульний склад бортової цифрової обчислювальної машини (БЦОМ), бортової системи картографічної інформації (БСКІ), бортової графічної станції (БГС), бортової інтерфейсної станції (БІС), виконаних із застосуванням розглянутих модулів: МВ, МВВ, МГ, ММП, МК, МН.

Помодульний склад бортових обчислювачів класу ІМА

Найменування виробу	Назва модуля					
	МВ	ММП	МН	МВВ	МР	МК
БЦВМ	+	+	+	–	–	–
БГС	+	+	+	–	+	+
БІС	+	+	+	+	–	–
БСКІ	+	+	+	+	+	–

У кожному з поданих у табл. 2.3 виробів входить модуль ММП, модуль МВ та модуль МН, т.к. без цих модулів робота виробу неможлива. Наявність модулів МВВ, МР та МК залежить безпосередньо від призначення виробу. Так, для БЦОМ немає необхідності у введенні в її структуру модулів МР, тоді як для БГС та БСКІ вони виконують основні функції роботи з відеозображенням. Модуль МК потрібен лише БГС, а модуль МВВ – для БІС і БСКІ.

Обчислювальні структури виробів класу ІМА, виконаних на основі пропонуваніх функціональних елементів авіоніки, представлені на рис. 2.6 [5, 6]. На малюнку наведено структури виробів БГС, БІС, БЦОС та БЦКС.

У наведених структурах реалізовано принцип подвійного резервування (кожен модуль міститься в подвоєній кількості), реалізація якого не є необхідною. Як видно із рис. 2.6, всі модулі, що входять до складу однієї обчислювальної системи з'єднані в локальну мережу (інтерфейсом SpaceWire) шляхом з'єднання «точка-точка», тобто. кожен модуль має інформаційну лінію передачі із кожним іншим модулем. Таким чином, за умови, що резервування може бути реалізовано на рівні виробу в цілому, система може використовувати всі функціональні модулі, що містяться в конструктивне виконання обчислювальної системи, що підвищує продуктивність системи.

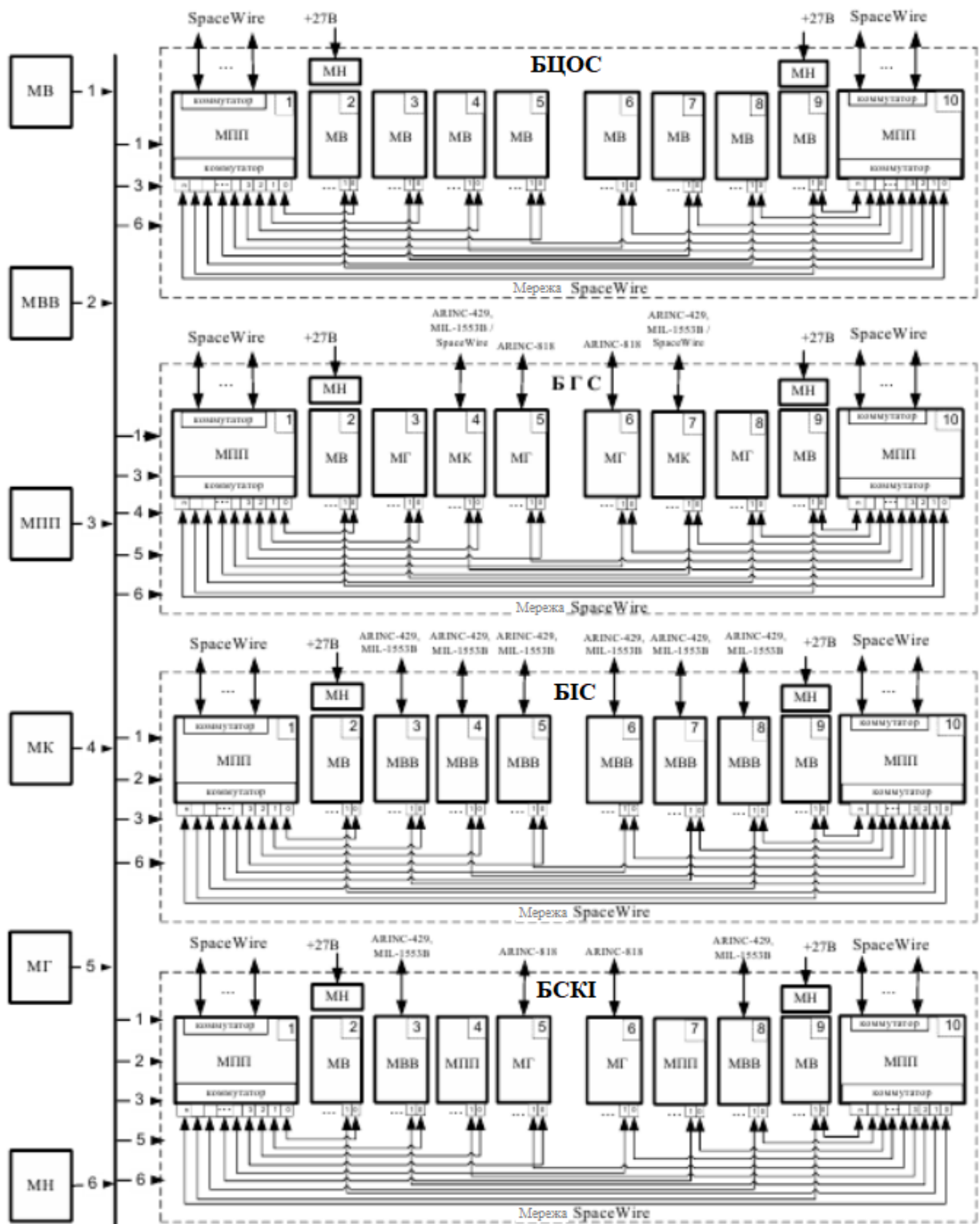


Рис. 2.6. Склад та внутрішні структури обчислювальних систем ІМА

### 2.3. Принципи послідовної та паралельної перевірки функціонування мультиобчислювача

На етапі розвитку авіаційного устаткування ускладнення завдань, виконуваних на борту ЛА, запровадження нових структурних і схемотехнічних рішень призвело до появи різних підходів до організації перевірки ОМ і розробки засобів контролю [7,8].

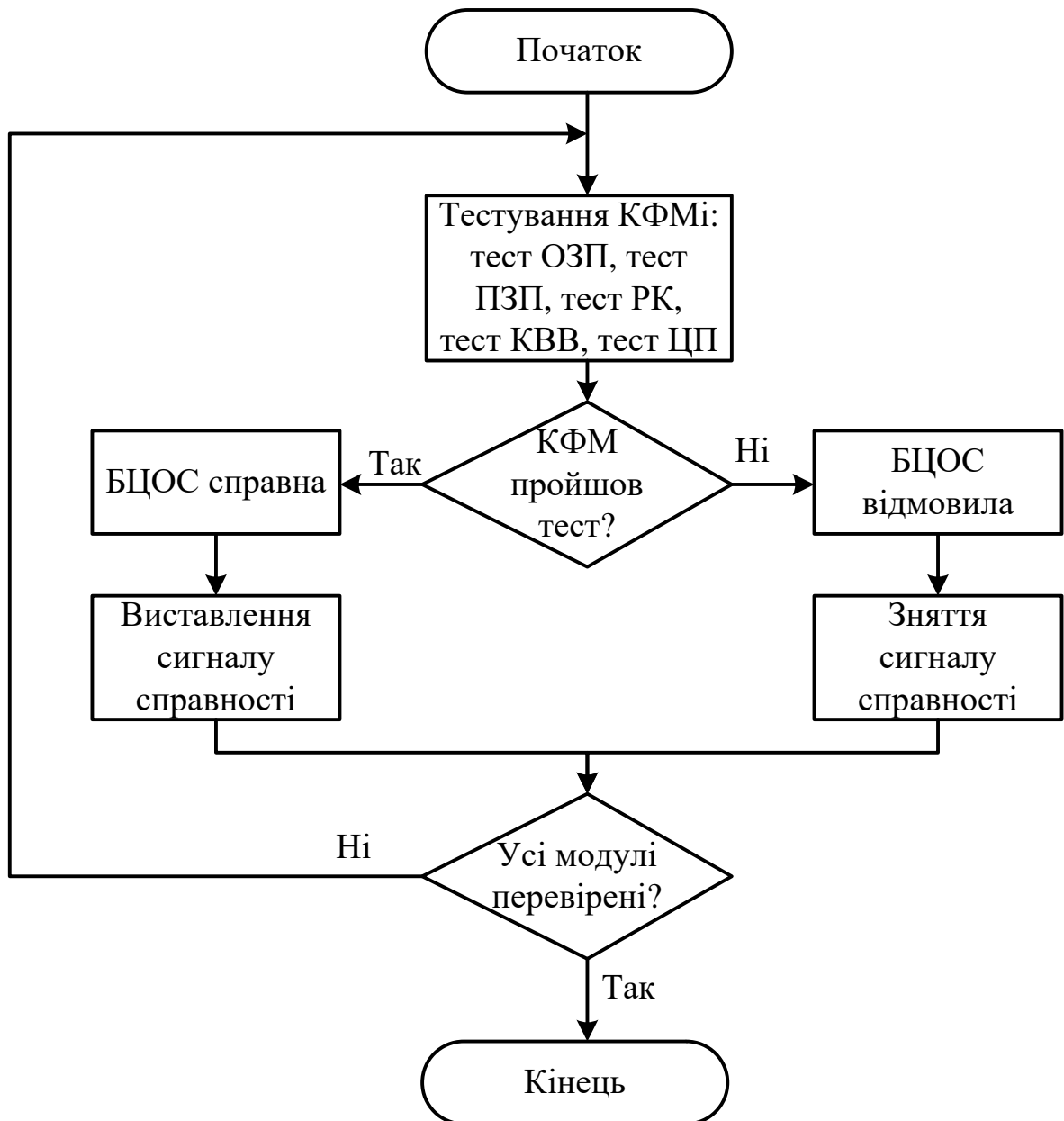


Рис. 2.7. Алгоритм циклу тестування ОМ за послідовної схеми перевірки

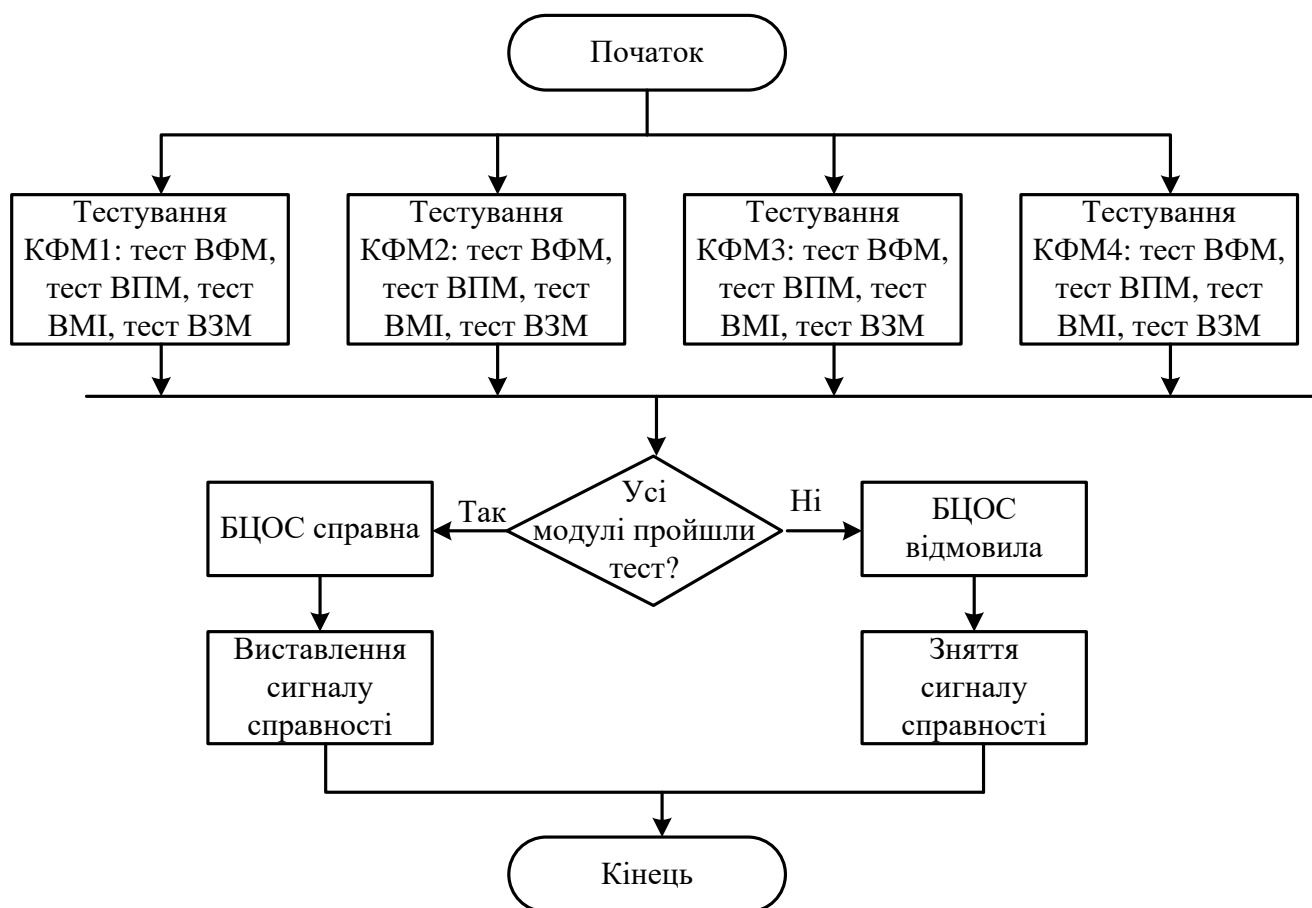


Рис. 2.8. Алгоритм циклу тестування ОМ за паралельної схеми перевірки

Так як у ОМ 4-ого покоління (федеративний принцип) застосовувалася топологія «загальна шина» з одним провідним модулем, який ініціював процедуру перевірки, тестовий контроль виконувався лише за послідовним алгоритмом перевірки, приклад якого представлений на рис. 2.7. Тест модулів складався з процедур виконання підтестів окремих вузлів модуля. Для кожного із вузлів виконувались спеціалізовані тести.

У процесі перевірки процесорного елемента використовується тест команд і переривань. Тест команд передбачає виконання кожної команди зі складу системи команд мікропроцесора, у своїй використовуються всі види адресації. Тест переривань передбачає перевірку правильності роботи мікропроцесора зі стеком, перевірку правильної реакції мікропроцесора на можливі види переривань, що підтримуються системою, у тому числі – на «аварійні» переривань (т. зв. винятків), що виникли, наприклад, при програмному зверненні до фізичного пристрою неіснуючою фізичною адресою абонента на шині.

У процесі перевірки осередків пам'яті ПЗП використовується підпрограма підрахунку контрольної суми секторів або ПЗП загалом та її порівняння із заданим значенням. ПЗП може перевірятися повністю або по секторах, відповідно значень контрольної суми може бути кілька (за кількістю секторів, що перевіряються) або одне. Значення контрольних сум зберігаються в незадіяних осередках пам'яті цієї ПЗП. При цьому під час роботи в динамічному режимі осередку пам'яті ПЗП цього КФМ не модифікуються.

У процесі перевірки осередків пам'яті ОЗП в кожен комірку заноситься певний код, який зчитується з тієї ж комірки пам'яті і порівнюється із записаним раніше (тобто виконується тест «одиниці, що біжить» або «біжучого нуля»). Окремо проводиться тест адрес. Під час роботи у динамічному режимі перевірка модуля може проводитися тільки тій частині ОЗП, яка не задіяна для вирішення бортового завдання.

У процесі перевірки КВВ забезпечується перевірка комутації однотипних вхідних та вихідних приймально-передавачів КФМ з метою передачі та прийому тестової кодової посилки. При такій схемі перевірки з петлевым зворотним зв'язком реалізується перевірка всього прийомопередаючого тракту модуля. Під час роботи в динамічному режимі перевірка може здійснюватися тільки з використанням міжмашинного ресурсу з передачею міжмашинних каналів зв'язку тестових кодових посилок, використанням бітів парності коду та ін.

Алгоритм послідовної перевірки є ресурсомістким і неприпустимим для перспективних пристроїв, що працюють у реальному масштабі часу та виконують трудомісткіші завдання за критерієм мінімізації директивного часу виконання бортового завдання.

У перспективних ОМ використовуються обчислювальні модулі, які ініціюють і виконують тест самостійно відповідно до алгоритму ПЗ. У такій системі здійснюється алгоритм паралельної перевірки, наведеної на рис. 3.2 б. Після подачі електроживлення на ПС, кожен з КФМ, що входить до складу ПС (на рис. 3.2, б представлений приклад для 4 КФМ), ініціює свій тест початкового включення, який перевіряє кожен з вузлів модуля послідовно. Після виконання кожного етапу

перевірки (тестування одного з вузлів КФМ) формується результат перевірки, який заноситься (зберігається) в ВКД та викликається при формуванні інтегрального сигналу справності КФМ.

Таким чином, тестування обчислювальних систем проводиться на борту літака під час польоту, а також на заводі-виробнику. У польоті проводиться повний набір тестів: тест початкового включення, фонові тести та ініційовані (автономні) тести. На автоматизованому робочому місці не потрібно проводити весь набір тестів, і можна обмежитися лише автономним тестом, так як він може проконтролювати весь набір функціональних елементів, що входять до обчислювальної системи (модуль). На рис. 2.9 представлені всі види тестів, які використовуються для контролю БЦОМ. Тести підрозділяються на тести, що виконуються у польоті, та тести, що виконуються у складі уніфікованого автоматизованого робочого місця (УАРМ). Тести можуть виконуватися для обчислювальних систем ІМА як за послідовним алгоритмом, так і паралельним. Для обчислювальних систем четвертого покоління можливий лише варіант послідовного виконання тестів.

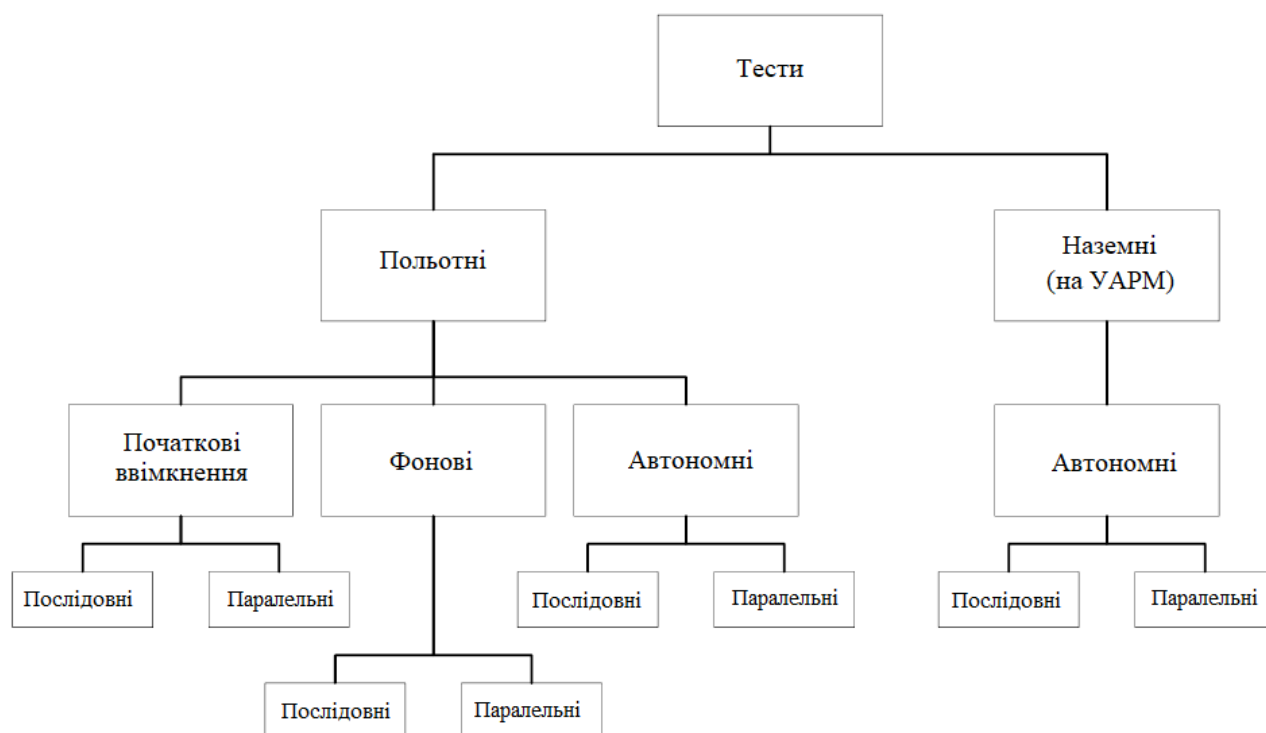


Рис. 2.9. Види тестів, які застосовуються контролю БЦОМ



## 2.4. Алгоритм фонового контролю мультипроцесора ІМА

Структура ОМ заснована на схемі, що є комбінацією мережевих топологій «повнозв'язна мережа» і «подвійна зірка»: 2 МПП з'єднані з кожним з 8 ФМ, які з'єднані між собою за принципом «кожний з кожним».

Кожен КФМ має комутацію з іншими модулями ОМ по окремій фізичній лінії зв'язку, що дозволяє відмовитися від проведення внутрішнього контролю кожного модуля та організувати ініціювання зовнішнього функціонального контролю в ОМ в цілому. Зовнішній функціональний контроль підвищує рівень повноти контролю з допомогою використання у процесі перевірки різних ділянок пам'яті, каналів вводу-вивода, мережного інтерфейсу. При цьому для організації зовнішнього контролю схеми перевірки, що складається з одного модуля, що тестує інший модуль у складі ОМ, виявляється недостатньою.

Необхідно, щоб кожен модуль проходив як мінімум три етапи перевірки від різних модулів, що входять до складу ОМ. Потім результат тестування визначається за схемою мажорювання результатів тестування КФМ у трьох етапах перевірки.

Кожен КФМ ініціює тестування за певним параметром трьох інших модулів системи. Причому всі три етапи тестування засновані на виконанні функціонального завдання, що виконується в польоті цим КФМ. Три КФМ передають КФМ, що перевіряється, різні тестові дані, які модуль обробляє, отримує результат перевірки для кожного з пред'явлених тестів і передає результат перевірки назад тому модулю, який ініціював тест. Алгоритм такого контролю одним ФМ представлений на рис. 2.10 і є реалізацією наступних процедур [8]:

1. Перший сторонній ФМ (наприклад, ФМ2) ініціює функціональний тест для модуля ФМ1, що перевіряється. ФМ1 виконує даний тест, формує результат перевірки та передає його модулю ФМ2.

2. ФМ1 ініціює функціональний тест ФМ2. ФМ2 виконує тест і передає результат перевірки ФМ1. ФМ1 порівнює отриманий ФМ2 результат перевірки з еталонним результатом, що міститься у пам'яті модуля ФМ1. Потім ФМ1 передає

модулю-арбітру результат проходження ФМ2 тесту: якщо еталонний результат перевірки збігається з отриманим від ФМ2 результатом, значить ФМ2 справний і може продовжувати виконувати бортове завдання, якщо не збігається - модуль ФМ2 несправний.



Рис. 2.10. Алгоритм роботи функціонального модуля у режимі тестового контролю (приклад тестування одного ФМ)

3. Наступний сторонній ФМ ініціює функціональний тест ФМ1. ФМ1 виконує тест, формує результат перевірки та передає його модулю ФМ3.

4. ФМ1 ініціює функціональний тест для ФМ3, отримує від нього результат перевірки, порівнює результат з еталонним значенням і передає модулю-арбітру результат: справний чи несправний ФМ3.

5. Наступний сторонній ФМ (у разі ФМ4) ініціює функціональний тест для ФМ1. ФМ1 виконує даний тест, формує результат перевірки та передає його модулю ФМ4.

6. ФМ1 ініціює функціональний тест для ФМ4, отримує від нього результат перевірки, порівнює його з еталонним значенням і передає модулю арбітру результат тесту: справний чи несправний ФМ4.

Паралельно з цим при отриманні сторонніми модулями, які ініціювали тест ФМ1, тобто ФМ2, ФМ3 і ФМ4, результатів від ФМ1 ці модулі порівнюють отриманий результат з еталонним, який знаходиться в їх осередках постійної пам'яті і направляють результат (справний або несправний модуль ФМ1) арбітру модулю. На рис. 2.10 представлений алгоритм тестування лише одного з чотирьох модулів. Інші модулі, у тому числі і модуль-арбітр, проходять тестування аналогічним чином: контроль ФМ2 ініціюють ФМ1, ФМ3 та ФМ4; контроль ФМ3 ініціюють ФМ1, ФМ2 та ФМ4, контроль ФМ4 ініціюють ФМ1, ФМ2 та ФМ3.

Таким чином, всі ФМ в одній підсистемі БЦОМ проходять три фази тестування, ініційовані різними сторонніми модулями однієї підсистеми, і ініціюють тестування трьох інших ФМ.

Після того, як модуль-арбітр, роль якого виконує МПП, отримує всі результати проходження всіма ФМ тестів, МПП аналізує ці результати і формує інтегральний сигнал справності БЦОМ, або (при виявленні модуля, що відмовив) запускає процедуру реконфігурації обчислювальної системи.

Алгоритм аналізу модулем-арбітром результатів виконання тестів одного функціонального модуля представлений на рис. 2.11. Арбітр аналізує дані тестів від трьох модулів, що ініціюють тест для одного функціонального модуля, і якщо від двох з них була отримана інформація про розбіжність контрольних значень

виконання тестів, модуль вважається несправним. Результати тестування для інших функціональних модулів аналізуються за аналогічним алгоритмом. Наприклад, від ФМ2 та ФМ3 прийшли дані про успішне проходження тесту ФМ1, а від ФМ4 прийшли дані про неуспішне проходження тесту ФМ1. Тоді, згідно з алгоритмом на рис. 2.11 ФМ1 вважатиметься справним.

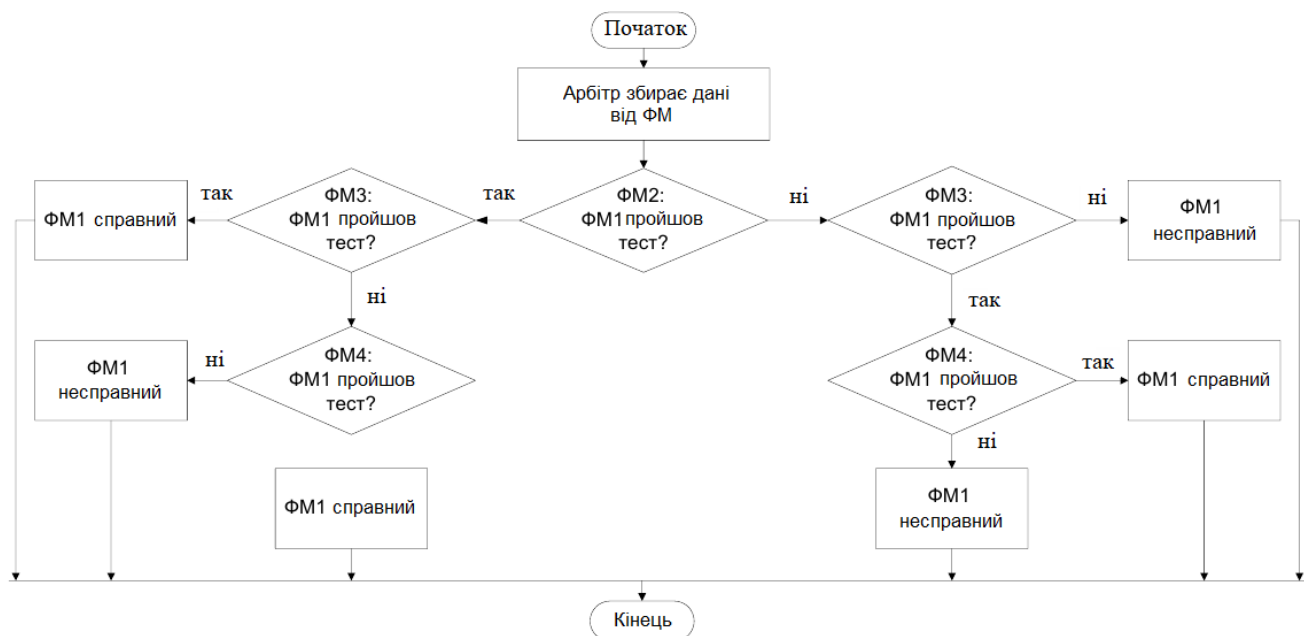


Рис. 2.11. Алгоритм аналізу результатів тестування одного функціонального модуля модулем-арбитром

## 2.5. Принцип побудови автоматизованих робочих місць

До складу засобів контролю ОМ та її компонентів входять:

- інструментальна електронно-обчислювальна машина (ІЕОМ) (персональний чи промисловий комп'ютер);

- спеціалізоване програмне забезпечення (програмні модулі (ПМ) перевірки ОЗП, ПЗП, перевірки каналів введення-виведення, перевірки центрального процесора (CPU - Central Processor Unit), програмні модулі підтримки бортових інтерфейсів ARINC-429, ARINC-818, MIL-1553, SpaceWire);

- спеціалізоване апаратне забезпечення (інтерфейсні плати сполучення інструментальної ЕОМ (через порти PCI/USB) та виробу (через інтерфейси ARINC-

429, ARINC-818, MIL-1553, SpaceWire), а також з'єднувальні кабелі зв'язку та джерела живлення).

У сукупності зазначені компоненти є автоматизованим робочим місцем (АРМ) з перевірки ОМ. АРМ розробляється на підставі технічного завдання в рамках чинної нормативно-технічної документації (НТД) і також включає спеціальне вимірювальне та випробувальне обладнання, методики випробувань ЗС та її компонентів (модулів). Для перевірки КФМ, що входять до складу ЗС, розробляються самостійні АРМ [2].

### **2.5.1. Автоматизоване робоче місце з контролю та діагностики ОМ**

При виготовленні ПС на заводі-виробнику необхідно перевірити стан апаратури обчислювальної системи на функціонування. Для цього використовується ПЗ АРМ з перевірки ОМ.

Для перевірки працездатності ОМ на автоматизованому робочому місці перевірки використовуються засоби вбудованого контролю та засоби наземного контролю.

Засоби вбудованого контролю складаються з:

- тесту початкового включення всіх модулів, що входять до ОМ;
- тесту фоновому контролю всіх модулів, що входять до БЦОМ під час завантаження функціонального програмного забезпечення;
- тесту наземного контролю всіх модулів, що входять до ОМ;
- інструментальної програми для перевірки ОМ, встановленої на ПЕОМ.

Тест наземного контролю складається з:

- тест осередків пам'яті ОЗА, ПЗП;
- тест мікроконтролерів та мікропроцесорів;
- тест пристроїв введення-виведення (для МВВ);
- тест каналів введення-виводів.

Після проходження всіх тестів формується або знімається сигнал справності кожного модуля окремо залежно від результатів виконання тесту. Якщо тест

закінчено з позитивним результатом, встановлюється, якщо з негативним, знімається. Результат виконання тесту передається в ПЕОМ каналами SpaceWire.

Програма контролю ОМ записує тести наземного контролю у КФМ, проводить перевірку внутрішньосистемних та зовнішніх каналів обміну. Після проходження тесту програма контролю аналізує сигнали справності КФМ та формує інтегральну справності всієї ОМ.

Функціональна схема АРМ з перевірки ОМ представлена на рис. 2.12.

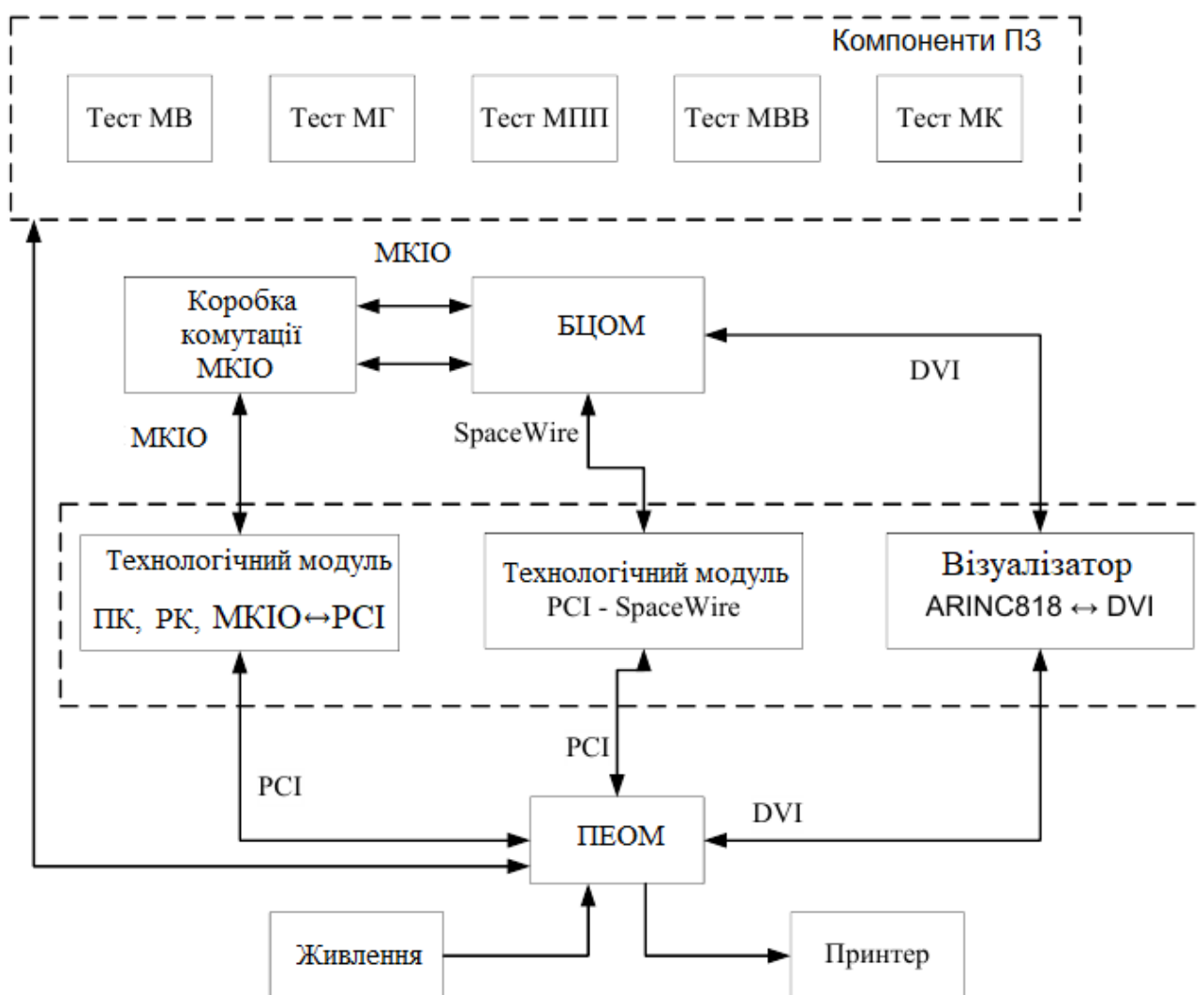


Рис. 2.12. Схема автоматизованого робочого місця для перевірки БЦОМ класу ІМА (DVI – Digital Visual Interface).

АРМ забезпечує [3]:

- завантаження програмного забезпечення для тестування ОМ;
- процес тестування ОМ;

- контроль інформації, що видається;
- імітацію обміну каналами вводу-вивода (SpaceWire, ПК, МКІО).

До складу АРМ перевірки ОМ входять [8]:

- ПЕОМ, у складі якої встановлено технологічні модулі для забезпечення інформаційного обміну каналами SpaceWire, МКІО, ARINC-429, для забезпечення прийому та видачі графічного зображення;

- принтер для документування процесу тестування;
- комплект сполучних жгутів;
- джерела живлення;
- програмне забезпечення для тестування.

Інструментальна програма для перевірки ОМ забезпечує занесення до ОС тестового ПЗ та обмін інформацією з КФМ, що входять до складу БЦВС.

У процесі виробництва КФМ виробники стикаються з проблемою контролю якості продукції, що випускається. Традиційно контроль якості продукції на авіаприладобудівному підприємстві здійснюється за допомогою перевірки кожного виробу у складі автоматизованого робочого місця.

АРМ з перевірки КФМ має забезпечувати:

- імітацію процесів інформаційного обміну за інтерфейсами SpaceWire для всіх типів модулів, за ПК, РК, МКІО для модулів введення-виведення, за інтерфейсом Fibre Channel для модуля графічного та модуля-комутатора;

- контроль процесу тестування;
- завантаження програмного забезпечення, тестування та ведення файлів звіту з тестування кожного модуля.

Функціональна схема АРМ представлена на рис. 2.13.

АРМ із перевірки КФМ містить:

- інструментальну електронно-обчислювальну машину, що забезпечує встановлення інструментальних та програмних засобів;

- технологічне обладнання (технологічні модулі, що забезпечують сполучення інтерфейсів КФМ та інтерфейсів ПЕОМ, комплект з'єднувальних жгутів для

з'єднання рами із встановленим КФМ з технологічним обладнанням та джерелом живлення);

- програмне забезпечення для тестування кожного модуля, принтер для виведення на друк результатів тестування;

- джерело живлення подачі напруги на КФМ;

- комплект експлуатаційної документації, що містить інструкції для перевірки та завантаження тестового програмного забезпечення.

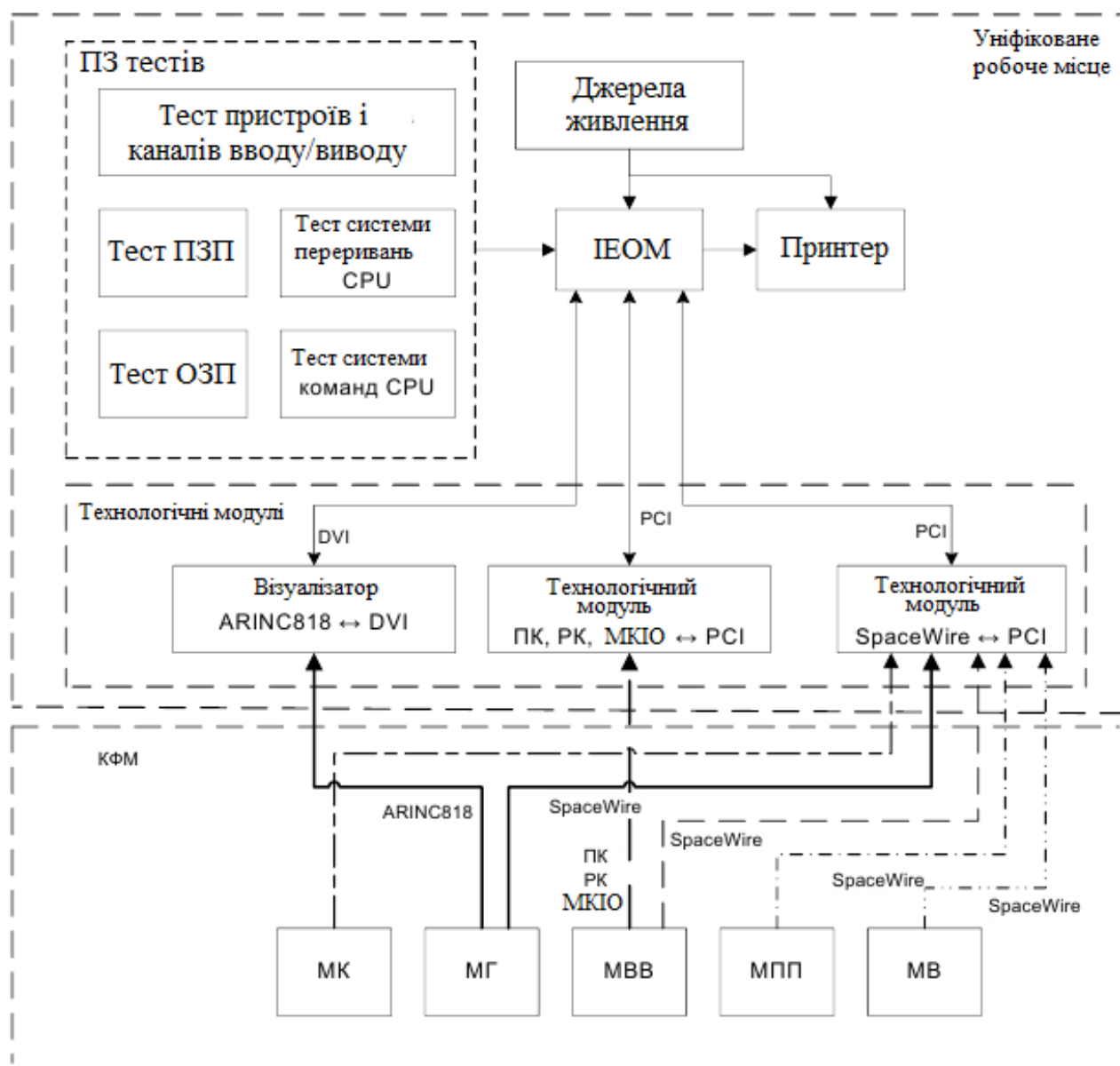


Рис. 2.13. Функціональна схема уніфікованого автоматизованого робочого місця (DVI – Digital Visual Interface)



В уніфікованому робочому місці використовуються компоненти технологічного обладнання, специфічні по відношенню до типу модуля, що тестується. Для МВ потрібен лише технологічний модуль, що забезпечує поєднання інтерфейсу PCI та інтерфейсу SpaceWire. Для МВВ додатково необхідний технологічний модуль для сполучення каналів ПК, РК та МКІО з інтерфейсом ІЕОМ. Для МГ необхідний технологічний модуль для сполучення SpaceWire та PCI, а також візуалізатор для сполучення інтерфейсу Fibre Channel та DVI. Візуалізатор підключається безпосередньо до монітора з виходом DVI. Відмінності у схемах зв'язку для різних типів КФМ показано на рис. 2.13 різними типами ліній.

Тестування починається з подачі на КФМ напруги живлення. Потім завантажуються та запускається необхідне програмне забезпечення для тестування модуля. Під час тестування модуля перевіряються всі вузли КФМ: осередки пам'яті ОЗП, осередки пам'яті ПЗУ, система команд процесора, система переривань процесора, пристрої та канали введення-виведення. Усі результати тестування видаються на екран, а також заносяться до звіту. Розрізняють 2 види алгоритмів перевірки модулів у складі АРМ: у послідовному режимі та в паралельному режимі.

Інструментальна програма перевірки КФМ забезпечує занесення до КФМ тестового ПЗ по технологічному каналу та обмін інформацією між ІЕОМ та КФМ.

## **Висновки з другого розділу 2**

1. Комплекси бортового радіоелектронного обладнання сучасного ЛА будуються на базі уніфікованих конструктивно-функціональних модулів, номенклатура яких представлена шістьма видами:

- модуль обчислювальний;
- модуль графічний;
- модуль введення-виводу;
- модуль масової пам'яті;
- модуль-комутатор;

- модуль напруги.

2. Різні за своїм призначенням КФМ виходять шляхом введення у внутрішню структуру уніфікованого базового модуля авіоніки нових спеціалізованих функціональних компонентів: вузол функцій модуля для обчислювача, вузол функцій модуля для графічного модуля, вузол функцій модуля реалізації інтерфейсів, спеціалізовані мезоніни і інтерфейс пам'яті.

3. Різні за своїм призначенням обчислювальні системи класу ІМА будуються шляхом комбінування в єдиний конструктив різних за призначенням КФМ. Зокрема, з пропонованого набору КФМ у різних поєднаннях можуть бути отримані:

- бортова цифрова обчислювальна система;
- бортова цифрова картографічна система;
- бортова графічна станція;
- бортова інтерфейсна станція та ін.

4. На цей час сформувалися різні підходи до побудови засобів тестування. Тести апаратури бортового обладнання 4ого покоління не підходять для контролю обчислювальних систем 5-го покоління у зв'язку з істотною відмінністю в організації архітектури обчислювальних систем та збільшенні вимог щодо надійності та стійкості до відмови.

5. Тестування апаратури бортового обладнання 5-го покоління слід організувати з урахуванням нових підходів до архітектури обчислювальної системи. Конструктивно-функціональні модулі, об'єднані в єдину локальну мережу, слід тестувати шляхом зовнішнього функціонального контролю із запровадженням процедури мажорювання. Причому проведення тесту ініціюється стороннім модулем, що входить до складу обчислювальної системи.

6. Запропоновані схеми автоматизованого робочого місця та програмне забезпечення відповідає структурі модулів, представлених у 1 та 2 розділах.

7. Автоматизоване робоче місце та програмне забезпечення дозволяють проводити тестування за прийнятний час із забезпеченням заданих показників надійності.

## ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження поставлена мета виконана: проведено аналіз принципів побудови обчислювальних систем інтегрованої модульної авіоніки та її компонентів, проведено аналіз принципів контролю та діагностики обчислювальних систем ІМА, розроблено алгоритми контролю та діагностики обчислювальних систем ІМА під час польоту та під час налаштування на заводі-виробнику. Розроблено апаратно-програмний комплекс для налаштування та перевірки обчислювальних систем та її компонентів на заводі-виробнику.

Таким чином, у кваліфікаційній роботі отримано такі результати:

1. Проведено аналіз принципів побудови обчислювальних систем інтегрованої модульної авіоніки та її компонентів. Встановлено, що існує два напрями побудови архітектури обчислювальних модулів: на основі елементів ПЛІС та з використанням процесорів та співпроцесорів. Показано, що підхід до побудови архітектури обчислювальних модулів із використанням процесорів є більш перспективним. Запропоновано внутрішню структуру базового модуля, на основі якої можна побудувати внутрішню структуру будь-якого з функціональних модулів, необхідних для побудови різних обчислювальних систем.

2. Проведено аналіз існуючих методів та алгоритмів контролю та діагностики обчислювальних систем перспективного ЛА. Показано, що для обчислювальних систем 4-го покоління використовувався послідовний принцип побудови тестування. Запропоновано для перспективних обчислювальних систем використовувати паралельний принцип тестування.

3. Зроблено вибір технічних рішень на розробку алгоритмів контролю та діагностики обчислювальних систем перспективного ЛА. Показано, що для обчислювальних систем 4-го покоління використовувалось тестування кожного з модулів, що входять до складу системи окремо. Запропоновано нову схему тестування обчислювальної системи у процесі польоту, шляхом ініціювання зовнішнього функціонального контролю із запровадженням процедури мажорювання.

4. Запропоновано уніфіковане робоче місце перевірки, яке використовується для налаштування та перевірки компонентів обчислювальної системи перспективного ЛА. Показано, що для всієї номенклатури обчислювальних модулів класу ІМА можна використовувати уніфіковане робоче місце перевірки із застосуванням необхідних технологічних модулів перевірки.

## СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ananda, CM General aviation Aircraft avionics: integration & system tests [Текст] // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. - May 2009. - V.5. - Issue 5. - P. 19-25.
2. Ananda CM Avionics Systems, Integration, and Technologies of Light Transport Aircraft [Текст] / CM Ananda, KG Venkatanarayana, M. Preme [та ін] // Defence Science Journal. – July 2011. – Vol. 61. - No. 4. - P. 289298.
3. ARINC Specif. <http://www.arinc.com>.
4. Elbestawi M.A. Force Measurement / M.A. Elbestawi // Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. – 1999. – P. 600-615.
5. Instrument Flying Handbook. U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, 2008. – 387 p.
6. Civil avionic systems / Ian Moir, Allan Seabridge, Malcolm Jukes. / Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2003. – 2nd edition. – 612 p.
7. Prudenziati M. Handbook of Sensors and Actuators Thick Film Sensors (vol. 1) / M. Prudenziati. – University of Modena:ELSEVER, 1994.
8. Nyce, D.S. Linear position sensors: theory and application / D.S. Nyce, // John Wiley & Sons Inc. – 2004. – P. 179.
9. Elbestawi, M.A. Force measurement / M.A. Elbestawi // In The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook; Webster, J.G., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA. – 1999. – P. 23.1-23.17.
10. Fischer, J. Simple Device for Small Dimension Measurement Using CCD Sensor / J. Fischer, V. Haasz, T. Radil // 12th IMEKO TC4 International Symposium. – 2002. – P. 433-437.
11. Sheikh, A. Best-response algorithm for multiprocessor periodic scheduling [Текст] / A. Al Sheikh, O. Brun, P.-E. Hladik [та ін] // Proc. of the 23rd Euromicro Conference on Real-Time Systems. - 2011. - P. 228-237.

12. Watkins, CB Transitioning 3 Federated Avionics Architectures to Integrated Modular Avionics [Текст]/ CB Watkins, R. Walter // IEEE. - 2007.

13. Ott, Aiki. System Testing In The Avionics Domain [Текст]: Dissertation Zur Erlangung Des Grades Einer Doktorin Der Ingenieurwissenschaften. - Німеччина: Universität Bremen, 2007. - 434 p.

14. Bluff, RJ Integrated modular avionics: system modeling [Текст] // Microprocessors and Microsystems. - 1999. - №23. - P. 435-448.