

УДК 621.03

Н.П. Бородавка

Науково-технічне СКБ „ПОЛІСВІТ” ДНВП „Об’єднання Комунар”, Харків

ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СТРУКТУР ЖИВУЧИХ БОРТОВИХ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧИХ СИСТЕМ

Досліджено об’єднання функцій бортових інформаційно-керуючих систем (БІКС). Визначено принципи формування функціональних структур, що підвищують живучість БІКС. Сформульовано порядок формування таких функціональних структур.

бортова інформаційно-керуюча система, живучість, функціональна структура

Вступ

БІКС є системами реального часу й, як правило, критичного застосування. Крім того, їх варто розглядати як невідновлювані системи [1]. Тому максимально можливе надання БІКС властивостей надійності (безвідмовності) і живучості, що безпосередньо впливають на безпеку її функціонування, є невід’ємним завданням розробки цих систем. Зазначені властивості забезпечуються різними засобами, базовими серед яких є засоби, що надають БІКС властивість відмовостійкості й тим самим що забезпечують, у першу чергу, властивість надійності. Однак практично забезпечення абсолютної надійності утруднене або неможливо. Разом з тим для ряду БІКС допускається деградація функціонування аж до припинення із забезпеченням переходу в безпечний стан. Отже, живучість – не менш важлива й ключова властивість БІКС, ніж надійність, тому що підтримує пристосованість системи до поступової деградації, мінімізуючи обсяги втрати якості й необхідну ймовірність переходу в аварійно небезпечний (критичний) стан [2]. Тому актуальні завдання забезпечення живучості БІКС. Живучість далі розглядається як властивість БІКС зберігати при виникненні відмов обмежену (часткову) працездатність і забезпечувати в реальному часі безпечне функціонування або його припинення незалежно від причин, що викликали відмови.

В [1] як один із засобів підвищення живучості БІКС, додатковий до засобів забезпечення відмовостійкості, запропоновано використати функціональну структуру (ФС) БІКС (для ненадлишкових БІКС ненадлишкову ФС – НФС). Поняття ФС ґрунтується на тому, що БІКС функціонально являє собою множину задач, а виконання кожного завдання подається трійкою функцій: приймання даних, ухвалення рішення, видача даних. Під ФС розуміється варіант розбиття функцій всіх задач на множини й логічні зв’язки між ними так, що кожна множина виконується окремим компонентом (компонент – апаратні або програмні складові БІКС або їх об’єднання). На

підставі відомих авторів робіт можна стверджувати, що формування ФС (розподіл задач за компонентами) як самостійне завдання проектування БІКС не розглядається або є наслідком пропонування рішень із забезпечення відмовостійкості. В останньому випадку часто мова йде не про завдання БІКС як таких, а про завдання спеціального програмно-апаратного комплексу, що забезпечує відмовостійкість і є для БІКС надлишковим. Сказане відноситься як до теоретичних розв’язань, описаних, наприклад, у [3 – 6], так і до реалізованих на практиці [7, 8].

У рамках даної роботи БІКС подається як сукупність даних, компонентів і каналів зв’язку, а функціонування БІКС – прийманням, формуванням і видачею даних (як і виконанням задач). Живучість БІКС визначається здатністю БІКС забезпечувати при виникненні відмов наявність даних, що характеризують її працездатність і безпеку функціонування (контрольованих даних). Одержання даних залежить від працездатності компонентів, каналів зв’язку й правильності формування даних. В [1, 9, 10] викладені складові розробленого методу аналізу живучості БІКС, а саме:

- 1) визначені положення, на яких базується аналіз живучості БІКС;
- 2) розроблене єдине формалізоване подання ФС для побудови моделей різних типів, використовуваних при проведенні аналізу;
- 3) описані аналітичні детерміновані, аналітичні й імовірнісні й імітаційні моделі одержання даних;
- 4) уведена детермінована, імовірнісна й комплексна оцінка живучості БІКС.

На продовження зазначених досліджень ставиться завдання розробки методу формування (синтезу) ФС БІКС. *Об’єктом дослідження є ФС живучих систем, предметом – об’єднання функцій задач (виконання їх одним компонентом).*

Мета дослідження – визначення таких принципів об’єднання функцій задач, застосування яких підвищує живучість БІКС.

1. Загальний підхід, в, кор, стовуван, й пр, формуванні ФС

Уводяться наступні допущення:

1) для всіх компонентів зв'язок одного компонента з іншим здійснюється безпосередньо, без залучення третіх компонентів;

2) приймання і видача даних компонентом при зв'язку з іншими компонентами здійснюється по одному загальному каналу зв'язку;

3) виключається можливість неправильної передачі даних між об'єднаними функціями;

4) факт і ймовірність неправильного формування даних (дефекти проектування) не залежать від їх об'єднання;

5) імовірність відмови для кожного компонента однакова, не залежить від виконуваного їм об'єднання й має експоненціальний закон розподілу – відмови незалежні і їх інтенсивність λ постійна.

Допущення 1 – 4 дозволяють з усіх визначених раніше джерел відмов (компонент, канал зв'язку, формування даних) розглядати далі тільки відмови компонентів.

Експоненціальний закон розподілу загальноприйнято застосовувати для розв'язання задач надійності електронних виробів і систем, хоча одержувані оцінки мають більшу похибку [11 – 13]. Разом з тим експоненціальний закон розподілу може бути використаний як інструмент при оцінці придатності нових проектів і порівнянні різних проектів [13]. При розв'язанні задач формування ФС досить якісного порівняння імовірнісних оцінок БІКС із тією або іншою ФС. Використовуванним показником є ймовірність безвідмовної роботи, монотонна для будь-яких законів розподілу [11]. Тому застосування експоненціального закону розподілу припустимо. Для спрощення розрахунків прийнято, що λ має те саме значення на всьому розглянутому інтервалі часу, як якби БІКС функціонувала безупинно.

Для надлишкових БІКС допущення 5 дозволяє розглядати тільки навантажений резерв. Оскільки БІКС вважається невідновлюваною системою, резервування при цьому є резервуванням без відновлення й може бути постійним або заміщенням. Для спрощення розрахунків для резервування заміщенням прийнято, що перемикач абсолютно надійний. Тим самим резервування заміщенням зводиться до постійного резервування. У надлишкових БІКС забезпечення живучості БІКС у відношенні тих або інших наслідків невиконання функцій реалізується резервуванням всіх функцій, невиконання яких приводить до цих наслідків. Виділяються такі варіанти усунення наслідків невиконання якої-небудь функції:

1) “повне” резервування, при якому формуються всі вихідні дані резервованої функції, що забезпечує відказостійкість або живучість БІКС відносно

даної відмови; резервна функція може виконуватися так, що знижується якість функціонування БІКС, наприклад, за простішим алгоритмом;

2) “часткове” резервування, при якому формуються не всі вихідні дані резервованої функції, що забезпечує живучість БІКС; у зв'язку із цим можливо резервування однієї функції декількома іншими, кожна з яких формує частину її вихідних даних, наприклад, для використання різними іншими функціями; всі разом резервні функції можуть формувати всі вихідні дані резервованої функції, але кожна з них являє собою частковий резерв;

3) “вбудоване” резервування, реалізоване у функції, вхідними даними якої є вихідні дані резервованої функції; приймаюча їх функція сама заміняє відсутні дані (константою, непрямим відновленням значень за іншими даними) або виконується за резервним алгоритмом, що не використовує ці дані;

4) наслідки невиконання не усуваються – уважаються несуттєвими для продовження функціонування БІКС.

У рамках завдання формування ФС розглядаються тільки “повне” і “часткове” резервування, що виключає тимчасову й реалізовану в одному компоненті версійну надмірність. У випадку багатоканального резервування, у тому числі й багатoversійного, не можна явно виділити резервовані й резервні функції. Для такого виду резервування, як і для інших, завжди є функція, що обробляє вихідні дані функцій, які утворюють резерв, або відсутність цих даних, і тим самим реалізуюча “вбудоване” резервування. Тому багатоканальне резервування умовно можна подати як резервовану і її резервну функції, кожна з яких виконується одним компонентом, навіть якщо в дійсності потрібно більш, ніж один. Як і для інших видів резервування, невиконання цих функцій може приводити, залежно від алгоритму “вбудованого” резервування, до зменшення кратності резерву (далі – зменшенню резерву), зниження якості функціонування, безпечному припинення функціонування.

Загальний підхід до формування НФС полягає в аналізі наслідків об'єднання в порівнянні з базовим варіантом НФС. Базовим варіантом є повністю розподілена НФС – така, у якій кожна функція виконується окремим компонентом. Під наслідком об'єднання розуміється настання наслідків відмови виконуючого його компонента. Наслідки об'єднання аналізуються за детермінованими і імовірнісними оцінками. Детерміновані оцінки відповідають можливості настання менших наслідків об'єднання, імовірнісні – імовірності настання наслідків об'єднання.

При проведенні досліджень наслідки об'єднання визначаються як кількість невиконаних задач, критичність станів, у які переходить БІКС, залежить тільки від кількості невиконаних задач, а не від того,

які саме задачі не виконуються. Критичність тим більше, чим більше задач не виконалося. Функції, що не ввійшли в об'єднання, залишаються повністю розподіленими й завжди виконуваними. Для формування характеристики кожного об'єднання використовуються такі положення. Всі функції всіх задач утворюють неперетинні множини так, що невиконання кожної функції із приналежних одній множині приведе до одних і тих же наслідків, тобто кожній такій множині функцій (далі – множина за наслідками) відповідає множина наслідків невиконання цих функцій. У табл. 1 наведені можливі відношення $R(A, B)$ між парою множин наслідків A і B та позначення відповідних функцій.

Таблиця 1

Можливі відношення $R(A, B)$

Відношення між множинами A і B	$R(A, B)$	Позначення функцій множин A і B	Примітка
$A = B$	$R^{\text{збіг}}$	$F^{\text{збіг}}$	множини збігаються
$B \subset A$	$R^{\text{підм}}$	$F^{\text{підм}}$	множина є підмножиною іншої множини
$A \cap B \neq \{\emptyset\}, A \neq B, B \not\subset A$	$R^{\text{перет}}$	$F^{\text{перет}}$	множини перетинаються
$A \cap B = \{\emptyset\}$	$R^{\text{неперет}}$	$F^{\text{неперет}}$	множини не перетинаються

Об'єднання характеризується наявністю відношень R між множинами, яким належать об'єднані функції.

Для формування ФС надлишкових БІКС застосуємо той же підхід, що й для НФС. Всі функції всіх задач, нерезервовані, резервовані і резервні, утворюють неперетинні множини за наслідками, між якими можливі відношення $R^{\text{збіг}}$, $R^{\text{підм}}$, $R^{\text{перет}}$, $R^{\text{неперет}}$. Наслідками є не тільки невиконання задач, але й зменшення резерву, і зниження якості функціонування. Для поліпшення структурованості й спрощення подальшої роботи приймається, що резервні функції утворюють окремі множини. Відносно положення про приналежність функцій різним множинам резервовані й резервні функції нічим не відрізняються одна від одної. Крім того, з погляду процесу функціонування поняття “резервована функція” і “резервна функція” втрачають смисл, оскільки кількість і послідовність відмов практично непередбачені, і необов'язково, що спочатку перестане виконуватися резервована функція, а вже потім, при наступній відмові, резервна. Тому функції в об'єднаннях можуть розглядатися як нерезервовані (резерву не було спочатку або вже немає) і резервовані (резерв є). Функції, що резервують одна одну, не входять в одне об'єднання.

Формування оцінок для порівняння варіантів об'єднання функцій, проведення досліджень і аналіз отриманих даних виконані для НФС і поширені на ФС.

2.3. Спосіб, який порівнює варіанти об'єднання функцій

Ідея детермінованої оцінки ґрунтується на тому, що допускається відмова, але невідомо, який саме компонент відмовить. Числове значення детермінованої оцінки формується таким чином:

1) для кожної множини i , функції якої входять

в об'єднання, визначається відношення кількості задач N^{ϕ_i} , які не виконуються при невиконанні його функції, до кількості задач $N^{\text{об}}$, які не виконуються при невиконанні об'єднання:

$$Dt^{\phi_i} = \frac{N^{\phi_i}}{N^{\text{об}}};$$

2) детермінована оцінка визначається як $Dt^{\text{об}} = \min\{Dt^{\phi_i}\}$ і має смисл показника мінімальної еквівалентності об'єднання й базової НФС за наслідками (мінімального збігу наслідків); значення $1 - Dt^{\text{об}}$ є показником максимального погіршення об'єднанням наслідків відмови в порівнянні з тим, якби в базовій НФС відбулася одна відмова й не виконалася саме функція з мінімальним значенням Dt^{ϕ_i} , що ввійшла в об'єднання.

Таким образом, детермінована оцінка має числове значення або менше 1 (об'єднання погіршує живучість), або рівне 1 (об'єднання не погіршує живучість). Значення $Dt^{\text{об}} < 1$ означає, що внаслідок об'єднання в системі з'явилася можливість настання гірших (збільшилася кількість невиконуваних задач) наслідків у порівнянні з наслідками будь-якої функції, що ввійшла в об'єднання. Імовірнісна оцінка настання наслідків об'єднання $P^{\text{об}}$ дорівнює ймовірності відмови виконуючого його компонента. Імовірнісна оцінка настання тих же наслідків у базовій НФС $P^{\text{баз}}$ визначається з використанням формули повної ймовірності, де кожний доданок відповідає комбінації виконання й невиконання функцій об'єднання, що приводить до шуканих наслідків (тобто працездатного стану виконуючих їх компонентів і відмовам).

Для аналізу наслідків об'єднання використовується комплексна якісна оцінка, що являє собою комбінацію якісних значень його детермінованої й імовірнісної оцінок. Якісні значення детермінованої

оцінки визначаються її числовими значеннями й далі позначаються “гірше” і “так само”. Якісні значення імовірнісної оцінки визначаються відношенням між $P^{об}$ і $P^{баз}$ й позначаються “гірше” ($P^{об} > P^{баз}$), “так само” ($P^{об} = P^{баз}$), “краще” ($P^{об} < P^{баз}$). При проведенні досліджень використовувалася наближена рівність $P^{об}$ і $P^{баз}$ з допуском δ , тому що одержання точної рівності утруднено через похибки, що виникають внаслідок обмеженості розрядної сітки ПЕОМ, і не представляється практично необхідним, тобто: $P^{об} = P^{баз}$, якщо $\left| \frac{P^{об} - P^{баз}}{P^{об}} \right| \cdot 100 < \delta$. Живучість БІКС тим вище, чим краще детермінована й імовірнісна оцінки.

З удержання початков, хядан, хя

Принципи об'єднання функцій визначаються за результатами аналізу наслідків об'єднань із різними характеристиками. Даними для визначення принципів об'єднання є детерміновані й імовірнісні оцінки наслідків об'єднань.

Наслідки об'єднання визначаються наслідками вхідних у нього функцій, а наслідки функцій – структурою задач. Множина всіх можливих структур задач визначається кількістю задач і типами їх залежностей (задачі незалежні, одна задача впливає на іншу, завдання впливають один на одну). Для забезпечення повноти даних необхідно:

- 1) визначити мінімальну (для зменшення обсягу обчислень) кількість задач, повна множина структур яких включає всі сполучення типів залежностей задач;
- 2) сформувати множину структур задач, використовуваних при одержанні даних;
- 3) одержати детерміновані й імовірнісні оцінки всіх об'єднань для кожної структури.

Для існування у структурах задач усіх сполучень типів їх залежностей досить трьох задач. Одержання множини використовуваних структур задач проводилося в такий спосіб:

- 1) прямим перебором типів залежностей задач кожної пари сформована повна множина структур трьох задач;
- 2) визначені формально еквівалентні структури, тобто такі, які відрізняються тільки номерами задач (задача визначення ізоморфності орієнтованих графів); всі еквівалентні структури, крім однієї, виключені з подальшого розгляду;
- 3) визначені функціонально еквівалентні структури, що відрізняються одна від одної як такі, але мають однакову повну залежність (включає безпосередні і непряму) задач одна від одної; всі еквівалентні структури, крім однієї, виключені з подальшого розгляду.

Далі наведені всі отримані структури задач (уведені позначення: 1, 2, 3 – задачі; “i∅j” – задачі і та j незалежні; “i → j” – задача i впливає на задачу j; “i ↔ j” – задачі i та j впливають одна на одну):

- 1) 1∅2; 2∅3; 1∅3; 6) 1 → 2; 2∅3; 1 → 3;
- 2) 1∅2; 2 → 3; 1∅3; 7) 1 → 2; 2 ↔ 3; 1∅3;
- 3) 1∅2; 2 ↔ 3; 1∅3; 8) 1 ↔ 2; 2 → 3; 1∅3;
- 4) 1 → 2; 2 → 3; 1∅3; 9) 1 ↔ 2; 2 ↔ 3; 1∅3;
- 5) 1∅2; 2 → 3; 1 → 3; 10) 1 → 2; 2 → 3; 1 → 3;
- 11) 1 → 2; 2 ↔ 3; 1 → 3.

Для кожного об'єднання кількісні значення імовірнісних оцінок визначалися при $\lambda = 10^{-4}$ 1/год для часу функціонування 1 година, 10 годин, 1 доба, 1 тиждень, 1 місяць, 1 рік, 3 роки, 5 років, 7 років, 10 років, 15 років, 20 років, 25 років, 30 років. Для визначення якісних значень імовірнісних оцінок використалися значення $\delta = 0,5; 0,1; 0,01; 0,001\%$. Повна множина об'єднань для кожної структури задач сформовано прямим перебором всіх сполучень функцій. Отримано 43 характеристики всіх можливих об'єднань, для кожної з них визначена детермінована оцінка й побудовані графіки зміни кількісних і якісних значень імовірнісних оцінок на розглянутому часовому інтервалі. За сполучення значення детермінованої оцінки й характеру зміни імовірнісної оцінки виділено п'ять груп об'єднань G1, G2, G3, G4, G5. У табл. 2 для кожної групи наведені дані за вхідними у неї об'єднаннями: рядок 1 – відношення $R^{макс}$ максимальних по наслідках (покриваючих) множин; рядок 2 – кількість $N(F^{покр})$ функцій покриваючої множини (“1” – одна, “>1” – декілька); рядок 3 – наявність підмножин покриваючих множин (“-” – ні, “+” – є у всіх об'єднаннях, “+-” – є не у всіх об'єднаннях).

Таблиця 2

Дані груп об'єднань

G1	G2	G3	G4	G5
$R^{збіг}$	$R^{збіг}$	$R^{збіг}$	$R^{перет}; R^{неперет}$	$R^{перет}; R^{неперет}$
>1	>1	1	1, >1	1, >1
--	++	++	+-	+-

Отримані дані дозволяють зробити висновок про те, що характер якісної зміни імовірнісної оцінки кожного із вхідних у групу об'єднань залежить тільки від відношень $R^{збіг}$, $R^{перет}$, $R^{неперет}$ максимальних за наслідками (покриваючих) множин і не залежить від наявності й відношень їх підмножин. Тому відношення між покриваючими множинами використовуються далі як характеристика групи. Функції, що входять у покриваючі множини, позначаються $F^{покр}$. На рис. 1 наведені графіки змі-

ни в часі $P^{баз}$ й $P^{об}$ одного з об'єднань кожної групи для $\delta = 0,01\%$.

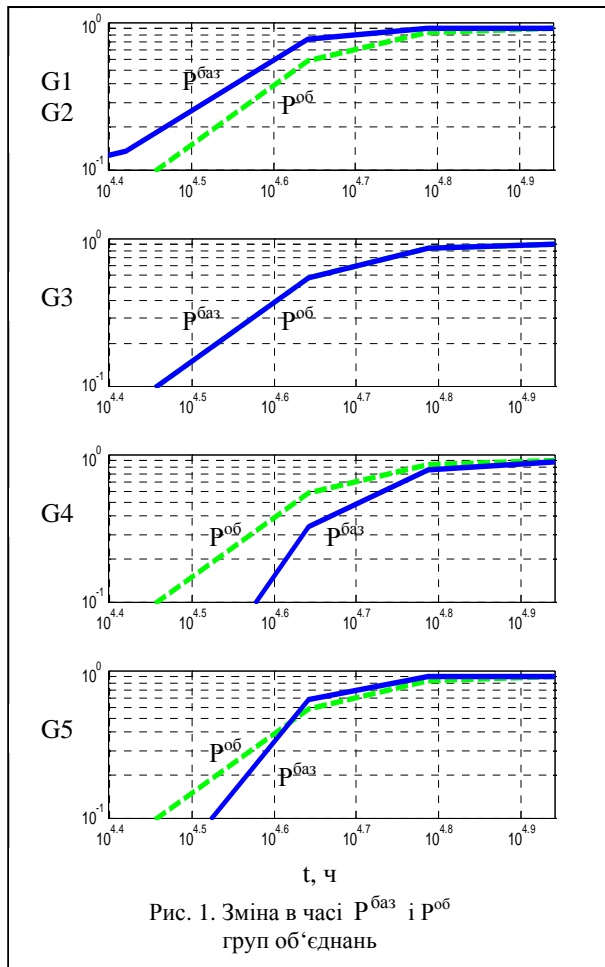


Рис. 1. Зміна в часі $P^{баз}$ і $P^{об}$ груп об'єднань

Графіки інших об'єднань можуть відрізнятися числовими значеннями залежно від конкретної характеристики об'єднання й кількості об'єднаних функцій. Якісні співвідношення $P^{баз}$ й $P^{об}$ на інтервалі часу $t = 0..10^{4,4}$ такі ж, як на момент часу $t = 10^{4,4}$. У табл. 3 наведені якісні значення $Dt^{об}$ і зміна в часі якісних значень $P^{об}$.

Таблиця 3

Якісні значення $Dt^{об}$ та $P^{об}$

	G1	G2	G3	G4	G5
$Dt^{об}$	так само	гірше	гірше	гірше	гірше
$P^{об}$	краще – так само	краще – так само	так само	гірше – так само	гірше – краще – так само

Таким чином, тільки об'єднання групи G1 є кращими і за $Dt^{об}$, і за якісним значенням $P^{об}$. Об'єднання груп G2 – G5 дають погіршення за $Dt^{об}$, але мають різні співвідношення $P^{баз}$ й $P^{об}$. З боку якісних значень $P^{об}$ найбільший інтерес викликають об'єднання групи G5, для яких ця оцінка з часом змінюється на протилежну, на відміну від

об'єднань груп G1 – G4. Через неоднозначність переваг об'єднань різних груп за сукупністю $Dt^{об}$ і $P^{об}$ перевага тих або інших об'єднань визначається в кожному конкретному випадку залежно від пріоритетності оцінок, їх числових значень і тривалості функціонування БІКС.

Раніше було зазначено, що функції, які не ввійшли в об'єднання, вважаються завжди виконуваними й не розглядаються, і фактично описані результати отримані в припущенні, що об'єднано всі функції тієї або іншої множини. У випадку, якщо об'єднані не всі функції множини, відношення R впливають на $Dt^{об}$, $P^{об}$ таким чином. Єдиним варіантом об'єднання, що не дає погіршення за $Dt^{об}$ в порівнянні з базовою НФС, є об'єднання довільної кількості функцій тільки однієї множини (група G1). Для об'єднань із іншими характеристиками об'єднання всіх або не всіх функцій однієї множини впливає тільки на детерміновану оцінку об'єднань із характеристикою $R^{підм}$.

У цьому випадку $Dt^{об}$ погіршується тільки в тому випадку, якщо об'єднані всі функції $F^{підм}$, тому що при цьому зникає можливість настання менших наслідків. На зміну числових значень оцінок $P^{об}$ і імовірнісних оцінок P^F настання наслідків виконання об'єднаних функцій впливає зміна кількості компонентів, що виконують функції тих множин, яким належать об'єднані функції. У табл. 4 наведена зведена інформація про те, як наявність відношень $R^{збіг}$, $R^{перет}$, $R^{неперет}$ у характеристиках груп і наявність відношення $R^{підм}$ у характеристиках об'єднань груп впливають на оцінки $Dt^{об}$ (стовпець 1), $P^{об}$ (стовпець 2).

Таблиця 4

Аналіз впливу

R	G1		G2		G3		G4		G5	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
$R^{збіг}$	x	+	x	+			x	x	x	+
$R^{підм}$			-	x	-	x	x	x	x	x
$R^{перет}$							-	-	-	-
$R^{неперет}$							-	-	-	-

Використовувані позначення: “+” – краще, “-” – гірше, “x” – без змін. Порожні позиції відповідають відсутності відношень R у характеристиках груп. Значення P^F поліпшується, якщо зменшується кількість компонентів.

Наявність $R^{підм}$ погіршує $Dt^{об}$ груп G2, G3 з урахуванням зробленого вище зауваження. Поліпшення $P^{об}$ групи G5 у порівнянні із групою G4

має місце, тому що в характеристиці групи G5 є тільки функції $F^{збіг}$.

Детерміновані оцінки отримані виходячи з того, що можлива тільки одна відмова. У випадку декількох відмов можлива поява “порожніх” відмов, внаслідок появи яких стан системи не змінюється. Така ситуація може мати місце, якщо жодна з відмов приводить до невиконання функцій однієї і тієї ж множини, – всі наслідки настануть при першій відмові. Для цього повинна існувати хоча б одна така група компонентів (далі – Z-група), для якої відмова будь-якого вхідного до неї компонента приводить до однакових наслідків. Наявність Z-груп збільшує імовірність настання тих або інших наслідків, але разом з тим створює можливість і збільшує імовірність появи “порожніх” відмов, і з такого погляду підвищує потенційну живучість системи. Тоді для об'єднання з характеристикою $R^{збіг}$ можливе значення $Dt^{об} < 1$, якщо кількість компонентів, що виконують тільки функції $F^{збіг}$, внаслідок цього об'єднання стає кількості, що допускає менше, відмов, тому що при цьому зникає можливість “порожніх” відмов.

Відповідно, і для об'єднання $R^{підм}$ його $Dt^{об} < 1$, коли та ж умова виконується для функцій $F^{підм}$, які є між собою функціями однієї множини.

Застосування положень, розглянутих для НФС, до ФС не має принципових відмінностей, а оцінки носять якісний характер. НФС є окремим випадком ФС, а ФС може перетворитися, повністю або частково, у НФС у процесі функціонування після тих або інших відмов.

Тому результати, отримані для НФС, вірні й для ФС і можуть використатися при ухваленні рішення про об'єднання нерезервованих і резервованих функцій різних множин. Крім того, хоча результати отримані з урахуванням допущення 5, їх можна вважати вірними й для інших видів резерву – полегшеного або ненавантаженого, у тому числі й для ковзного резервування. Обґрунтовується це тим, що в цих випадках імовірнісні оцінки будуть мати інші кількісні значення, але їх якісні співвідношення залишаться такими ж, а на інші характеристики обмеження, що накладаються допущенням 5, не впливають.

4. Додаткові оцінки, які дають надлишкові ФС

Для надлишкових ФС, на додаток до НФС, необхідно дослідити об'єднання резервованих і їх резервних функцій за таких причин:

1) у проведених дослідженнях не враховувалися інформаційні зв'язки між цими функціями, а вони при однакових об'єднаннях можуть бути різними і,

можливо, впливати на оцінки наслідків об'єднань;

2) потрібно, по можливості, підтвердження відносно таких функцій вірності для ФС результатів, отриманих для НФС, тому що правомірність цього обґрунтована тільки логічними міркуваннями;

3) для цих функцій можливе введення таких детермінованих оцінок, як максимально можлива кількість відмов $N_{max}^{вдм}$, що приводить до настання тих або інших наслідків, і кількість задіяних при резервуванні компонентів N^C , що виконують і резервовані, і резервні функції; значення N^C , нехай і побічно, характеризує обсяг резервування, маючи на увазі не тільки структурну, але й інформаційну, і функціональну надлишковості задіяних компонентів, і в цілому – ускладнення розробки; визначення цих оцінок вимагає окремого розгляду резервованих і резервних функцій;

4) необхідно розглянути розподіл резервованих і їх резервних функцій за Z-групами компонентів.

Результати, отримані відносно інших функцій, впливають із приналежності функцій різним множинам, незалежно від їх взаємин за резервуванням та інформаційних зв'язках між ними, і підтвердження не вимагають.

Для визначення досліджуваних варіантів об'єднань розглядалися всі їх варіанти для повного резервування, коли резервовані і резервні функції використовують вихідні дані одна одної. Кількість резервованих функцій $N = 2$. На рис. 2 представлені досліджувані варіанти з урахуванням розходження інформаційних зв'язків. Резервовані функції позначені як f_i , резервні – f_i^R , результуючі вихідні дані – Y . Інші варіанти так чи інакше еквівалентні представленим.

Варіанти можуть мати різновиди за рахунок змішаних варіантів об'єднання й інформаційних зв'язків між функціями. Можливий і випадок, коли резервовані функції однієї послідовності мають різну кількість резервних функцій. У кожному разі всі варіанти займають проміжне положення між “крайніми” варіантами A.1, B.1, C.1, D.1 і A.3, B.3, C.3, D.3, які й будуть аналізуватися далі. У табл. 5 зазначено, як визначалася імовірнісна оцінка $P^{вдм}$ припинення формування Y .

Імовірність відмови кожного з компонентів позначена як $P^{Свдм}$. У формулі повної імовірності кожний доданок відповідає такій комбінації відмов і працездатних станів компонентів, що приводить до настання шуканих наслідків – припинення формування Y . Для кожного варіанта значення $P^{вдм}$ визначалися при $\lambda = 10^{-4}$ 1/год для часу функціонування 1 година, 10 годин, 1 доба, 1 тиждень, 1 місяць, 1 рік, 3 роки, 5 років, 7 років, 10 років, 15 років,

20 років, 25 років, 30 років. Для забезпечення вірогідності результатів розглядалися значення $N = 2..5$.

На рис. 3 представлені графіки зміни в часі $P^{відм}$ при $N = 2$.

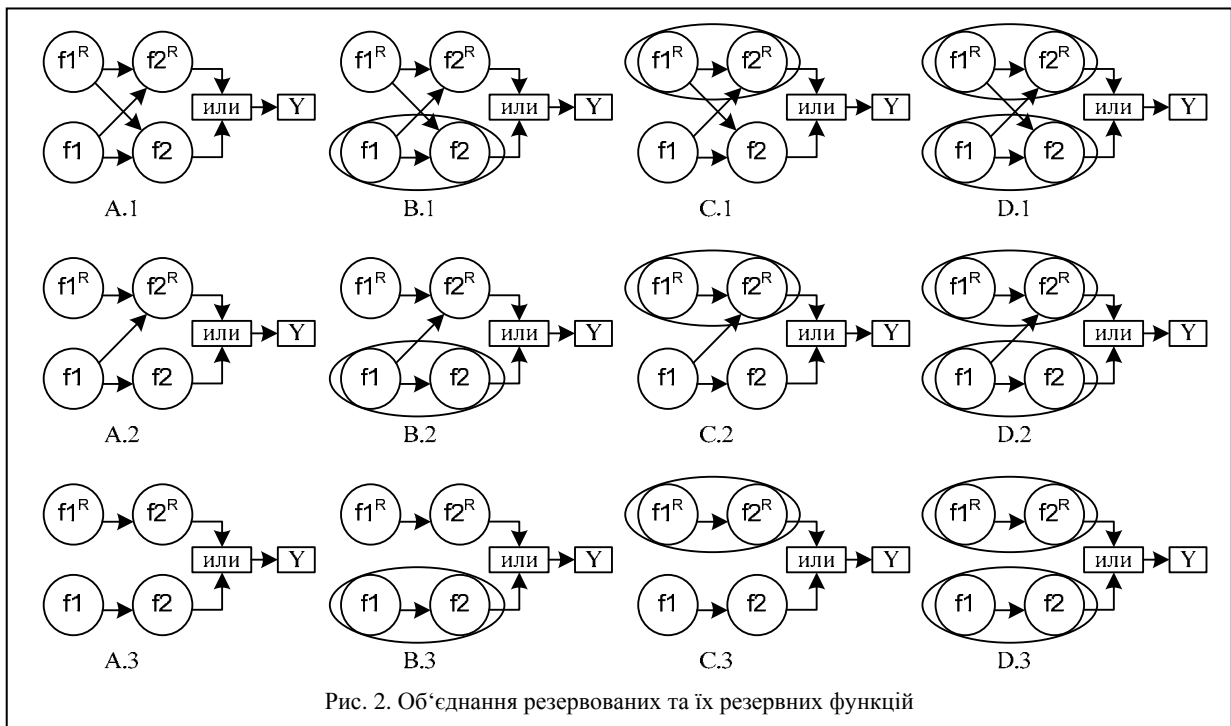


Рис. 2. Об'єднання резервованих та їх резервних функцій

Таблиця 5
Визначення імовірнісної оцінки $P^{відм}$

Варіант	Визначення $P^{відм}$
A. 1	за формулою повної імовірності
A. 3	$P^{відм} = (1 - (1 - P^{Свідм})^N)^2$
B. 1, B. 3, C. 1, C. 3	$P^{відм} = P^{Свідм} \cdot (1 - P^{Свідм})$
D.1, D.3	$P^{відм} = (P^{Свідм})^2$

При значеннях $N = 3..5$ якісні співвідношення значень $P^{відм}$ зберігаються. Таким чином, перевага варіантів за імовірнісною оцінкою убуває в такому порядку: D.1, D.3 → B.1, B.3, C.1, C.3 → A.1 → A.3. Отримані результати повністю погоджуються з отриманими раніше, що взаємно підтверджує їх правильність: чим більше об'єднані функції, невиконання яких приводить до загальних наслідків, тим менше імовірність настання цих наслідків. При визначенні детермінованої оцінки $N_{max}^{відм}$ враховуються тільки відмови, що змінюють стан системи, тобто якщо відмовив компонент з уже невиконаною послідовності функцій, така відмова не визначається. Фактично це задача визначення відказостійкості системи, розв'язувана в ряді робіт з використанням

теорії графів [14, 15]. У цьому випадку простота розглянутих варіантів дозволяє прямо визначити значення $N_{max}^{відм}$. У табл. 6 наведені значення цієї оцінки разом з описом найбільш сприятливої послідовності відмов. "X" відповідає буквеній складовій позначення варіанта. Мінімальна кількість відмов

$$N_{min}^{відм} = N^R + 1,$$

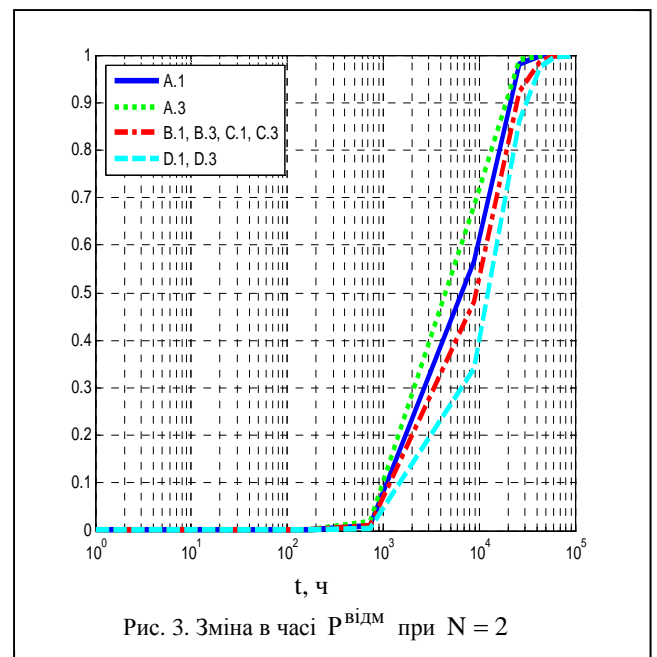


Рис. 3. Зміна в часі $P^{відм}$ при $N = 2$

де N^R – кратність резерву, однакова тут для всіх резервованих функцій. При переході від повністю розподіленого варіанта А.1 до максимально об'єднаних D.1 – D.3 у цілому простежується зменшення $N_{\max}^{\text{відм}}$, однак ця зміна не носить монотонного характеру. За оцінкою обсягу резервування N^C перевага варіантів очевидна: D.1,

D.3 → B.1, B.3, C.1, C.3 → A.1, A.3.

У табл. 7 зведені отримані результати за перевагою розглянутих варіантів. Перевага позначена у порядку убудування як “1”, “2”, “3”, “4”.

Однозначно кращого варіанта немає. Тому в кожному конкретному випадку вибір варіанта здійснюється залежно від пріоритетності й співвідношень чисельних значень оцінок.

Таблиця 6

Значення оцінки

X	Варіанти		Примітка
	X.1	X.3	
A	$N \cdot N^R + 1$	$N^R + 1$	для А.1 – будь-яка послідовність відмов; для А.3 – будь-яка послідовність відмов, кожна з яких приводить до невиконання однієї послідовності функцій, що формують Y
B	$N + N^R$	$N^R + 1$	для В.1 – послідовні відмови резервних функцій і потім - відмова компонента резервованих функцій; для В.3 – будь-яка послідовність відмов, кожна з яких приводить до невиконання однієї послідовності функцій, що формують Y
C	$N + N^R$	$N^R + 1$	для С.1 – послідовні відмови резервованих функцій і потім – відмова компонента резервних функцій; для С.3 – будь-яка послідовність відмов, кожна з яких приводить до невиконання однієї послідовності функцій, що формують Y
D	$N^R + 1$	$N^R + 1$	будь-яка послідовність відмов, кожна з яких приводить до невиконання однієї послідовності функцій, що формують Y

Таблиця 7

Результати, зведені за перевагою розглянутих варіантів

Оцінка	Перевага варіантів			
	1	2	3	4
$r^{\text{відм}}$	D.1, D.3	B.1, B.3, C.1, C.3	A.1	A.3
$N_{\max}^{\text{відм}}$	A.1	B.1, C.1	A.3, B.3, C.3, D.1, D.3	–
N^C	D.1, D.3	B.1, B.3, C.1, C.3	A.1, A.3	–

Розподіл резервованих і їх резервних функцій в одну Z – групу НФС знижує потенційну живучість системи, тому що зменшується кількість компонентів, при відмовах яких наступають однакові наслідки, а виходить, і кількість можливих “порожніх” відмов, – при відмові компонента з останньою резервною функцією наступлять інші, гірші, наслідки, чим при попередніх відмовах компонентів цієї Z – групи.

5 жФормЗванняяФСя

За результатами проведених досліджень визначені три загальних для НФС і ФС критерію для ухвалення рішення про об'єднання функцій задач, у сукупності не що завжди дозволяють прийняти однозначне рішення: $Dt^{об}$, $P^{об}$, P^F . Поліпшення детермінованих оцінок вимагає більшої розподіленості системи, а поліпшення імовірнісних – меншої. Тому в кожному конкретному випадку визначається пріо-

ритетність цих критеріїв для БІКС, і об'єднання формуються з урахуванням цієї пріоритетності й співвідношень числових значень оцінок. Формування ФС проводиться в такому порядку:

- 1) для кожної функції визначаються наслідки її невиконання і критичність відповідного стану БІКС;
- 2) формуються множини функцій за наслідками;
- 3) множини розподіляються за рівнями залежно від критичності їх наслідків; приналежність множини рівню визначається максимальною критичністю його наслідків; для визначеності приймається, що чим вище рівень, тим більше його критичність;
- 4) функції поєднуються за такими принципами:
 - а) функції, незалежно від того, належать вони до одного рівня або різних, не повинні поєднуватися, якщо при невиконанні цього об'єднання критичність стану БІКС більше критичності рівня; при цьому отримана критичність необов'язково повинна

збігатися із критичністю верхніх рівнів – можливі й проміжні варіанти, обумовлені комбінаціями різних наслідків;

б) функції різних рівнів можуть поєднуватися, якщо не погіршується детермінована оцінка об'єднання (інакше погіршується живучість БІКС);

в) якщо поєднуються функції одного рівня, то об'єднання залежить від того, чи має для даної БІКС значення тільки критичність її стану або ж і сполучення або обсяг наслідків, що наступили (наприклад, для парирування сформованої ситуації); у першому випадку всі функції рівня повинні виконуватися одним компонентом для зменшення імовірності переходу БІКС у цей стан, у другому – формуються об'єднання по $Dt^{об}$ оцінках $P^{об}$, P^F ; пріоритети цих оцінок для різних рівнів можуть бути різні;

5) якщо архітектура БІКС обмежує розподіл функцій, то спочатку розподіляються функції, виконання яких компонентами однозначно визначаються архітектурою, а потім, з обов'язковим обліком таких функцій – всі інші.

Для надлишкових ФС також ураховуються оцінки і результати, отримані для резервованих і їх резервних функцій.

Залежність критичності наслідків невиконання функцій від кількості невиконаних задач і розгляд об'єднання тільки як виконання функцій одним компонентом використалися для спрощення виконання й кращого розуміння роботи. Описаний підхід до об'єднання функцій застосуємо й до використання каналів зв'язку, а під наслідками невиконання функцій треба розуміти все, що визначає критичність стану БІКС, – невиконання вимог за призначенням, обумовлених технічним завданням, неможливість роботи інших систем і ін.

6) Приклад формування ФС на надлишковій БІКС

Сформуємо функціональну структуру ненадлишкової БІКС, описаної в [9]. Використається базовий опис виконання задач:

$$F1 = \{f1_1, f1_2, f1_3^2, f1_3^4, f1_3^M\};$$

$$F2 = \{f2_1, f2_2, f2_3^1, f2_3^3, f2_3^M\};$$

$$F3 = \{f3_1, f3_2, f3_3^M\};$$

$$F4 = \{f4_1, f4_2, f4_3^M\}.$$

Наслідками невиконання функцій є “неправильність” даних 1^M , 2^M , 3^M , 4^M . У табл. 8 наведені множини функцій за наслідками і відповідні їм множини наслідків (позначені однаково). Відношення між множинами наслідків:

$$R(A, B) = R(A, C) = R(A, D) = R(A, E) = R^{підМ};$$

$$R(B, C) = R(B, D) = R(B, E) = R(C, D) = R(C, E) = \\ = R(D, E) = R \text{ неперет.}$$

Розглядається формування ФС для всіх варіантів сполучень умов $Y1.Y2.Y3$. Умова $Y1$ – архітектура обмежує розподіл функцій, $Y2$ – всі наслідки мають однаковий рівень критичності, $Y3$ – значення має тільки критичність стану БІКС. Відсутність умови позначається “1”, наявність – “2”. У випадку, якщо наслідки мають різні рівні критичності, прийmemo, що є два рівні, множина A ставиться до верхнього, множина B, C, D, E – до нижнього.

Таблиця 8

Множини функцій і відповідні множини наслідків

Множина функцій за наслідками	Множина наслідків
$A = \{f1_1, f1_2, f1_3^2, f2_1, f2_2, f2_3^1\}$	$A = \{1^M, 2^M, 3^M, 4^M\}$
$B = \{f1_3^M\}$	$B = \{1^M\}$
$C = \{f2_3^M\}$	$C = \{2^M\}$
$D = \{f2_3^3, f3_1, f3_2, f3_3^M\}$	$D = \{3^M\}$
$E = \{f1_3^4, f4_1, f4_2, f4_3^M\}$	$E = \{4^M\}$

При цьому ніякі наслідки об'єднань функцій нижнього рівня не мають критичність більшу, ніж критичність нижнього рівня, якщо тільки вони не збігаються з наслідками верхнього рівня. Якщо значення мають і сполучення наслідків, що наступили, прийmemo, що чим менше наслідків наступило, тим краще. Мінімальними наслідками є 1^M , або 2^M , або 3^M , або 4^M . Вироблені рішення з формування ФС наведені в табл. 9.

Рішення представлені як розподіл множин A, B, C, D, E , їх підмножин і окремих функцій по компонентах $C1 - C5$. Компонент $C5$ в аналізованій БІКС відсутній і використовується як гіпотетичний компонент. Для всіх варіантів з умовою $U3=1$ (1.1.1, 1.2.1, 2.1.1, 2.2.1) можливість настання меншої кількості наслідків забезпечується тільки розподіленістю системи, і пріоритет має детермінована оцінка об'єднань. Для цих варіантів ставиться завдання організувати розподіл функцій так, щоб з урахуванням інших умов одночасно забезпечити можливість настання мінімальних наслідків і мінімізувати імовірність настання будь-яких наслідків.

Варіант 1.1.1 є найбільш складним для розподілу функцій за сукупністю всіх трьох умов $U1, U2, U3$. Функції множини A повинні виконуватися одним компонентом – таке об'єднання ставиться до групи $G1$, його $Dt^{об} = 1$, $P^{об}$ і P^F мінімальні. Об'єднання $A \cup B, A \cup C, A \cup D, A \cup E$ і їх сполучення (група $G2$) неприпустимі, тому що для них

$Dt^{06} < 1$, тим самим виключається можливість настання відповідних мінімальних наслідків, і, з урахуванням умови $Y2 = 1$, погіршується живучість БІКС. Об'єднання $A \cup D^1 \cup E^1$ (група G2) вирішують поставлену задачу для наслідків $3^M, 4^M$ за умови, що D^2, E^2 або не є об'єднаннями (складаються

з однієї функції), або є об'єднаннями групи G1, що забезпечує мінімально можливу імовірність настання цих наслідків. Будь-які об'єднання функцій з різних множин одного рівня B, C, D, E неприпустимі, тому що для них $Dt^{06} < 1$, і, з урахуванням умови $Y3 = 1$, погіршується живучість БІКС.

Таблиця 9

Вироблені рішення з формування ФС

Варіант B1.B2.Y3	Розподіл функцій за компонентами					Примітка	
	31	32	33	34	35		
1.1.1	$A \cup D^1 \cup E^1$	B	C	D^2	E^2	$D = D^1 \cup D^2$, $D^2 \neq \{\emptyset\}$; $E = E^1 \cup E^2$, $E^2 \neq \{\emptyset\}$	
1.1.2	$A \cup D^1 \cup E^1$	Довільний розподіл решти функцій ¹			-	-	$D = D^1 \cup D^2$, $D^2 \neq \{\emptyset\}$; $E = E^1 \cup E^2$, $E^2 \neq \{\emptyset\}$
1.2.1	$A \cup D^1 \cup E^1$	B	C	D^2	E^2	$D = D^1 \cup D^2$, $D^2 \neq \{\emptyset\}$; $E = E^1 \cup E^2$, $E^2 \neq \{\emptyset\}$	
1.2.2	AUBUCUDUE	-	-	-	-		
2.1.1	$A \cup B \cup D^1 \cup E^1$	C	$D^2 \cup f_{33}^M$	$E^2 \cup f_{43}^M$	-	$D = D^1 \cup D^2 \cup f_{33}^M$; $E = E^1 \cup E^2 \cup f_{43}^M$	
2.1.2	AUB	C	f_{33}^M	f_{43}^M	-		
	Довільний розподіл решти функцій						
2.2.1	$A \cup B \cup D^1 \cup E^1$	C	$D^2 \cup f_{33}^M$	$E^2 \cup f_{43}^M$	-	$D = D^1 \cup D^2 \cup f_{33}^M$; $E = E^1 \cup E^2 \cup f_{43}^M$	
2.2.2	B	C	f_{33}^M	f_{43}^M	-		
	Довільний розподіл решти функцій						

Примітка: ¹ – розподіл повинен бути таким, щоб наслідки об'єднань не збігалися з наслідками верхнього рівня.

Для варіанта 1.1.2 пріоритет має імовірнісна оцінка об'єднань. Об'єднання всіх функцій множини A обов'язково для мінімізації імовірності настання його наслідків (переходу БІКС у відповідний критичний стан). Об'єднання $A \cup D^1 \cup E^1$ (група G2) при $D^2 \neq \{\emptyset\}, E^2 \neq \{\emptyset\}$ припустимі, тому що не погіршують живучість БІКС. Варіанти об'єднань нижнього рівня забезпечують мінімально можливу імовірність переходу БІКС у критичний стан, що відповідає нижньому рівню. Об'єднання всіх функцій нижнього рівня неможливо, тому що при цьому збільшується рівень критичності наслідків.

Для варіанта 1.2.1 обґрунтування його розв'язання такі ж, як для варіанта 1.1.1, і при цьому не треба враховувати погіршення живучості БІКС внаслідок об'єднання функцій різних рівнів.

Для варіанта 1.2.2 рішення очевидно – всі функції повинні бути об'єднані (група G1), БІКС перстає бути розподіленою.

Для варіантів 2.1.1 і 2.2.1 обґрунтування їх

розв'язань такі ж, як для варіантів 1.1.1 і 1.2.1 відповідно, з тією різницею, що об'єднання $A \cup B$ й фіксоване виконання функцій f_{33}^M і f_{43}^M компонентами C3 й C4 вимушені, тому що визначаються архітектурою БІКС.

Для варіанта 2.1.2, як і для варіанта 1.1.2, обов'язкове об'єднання всіх функцій множини A. Залишені вільно розподілюваними функції нижнього рівня можуть довільно розподілятися по всіх компонентах C1 – C4, тому що мінімальність імовірності переходу БІКС у критичний стан, що відповідає нижньому рівню, і непогіршення внаслідок об'єднань живучості БІКС визначається й забезпечується її архітектурою.

Для варіанта 2.2.2 мінімальність імовірності переходу БІКС у критичний стан визначається архітектурою БІКС, і функції, що розподіляють вільно, довільно розподіляються за компонентами C1 – C4.

У дійсності для аналізованої БІКС архітектура обмежує розподіл функцій, настання хоча б одного

наслідку переводить її в критичний стан (тобто всі множини утворюють один рівень критичності), і значення має не тільки критичність наслідків, що наступили, але і їх обсяг. Таким чином, аналізованій БІКС відповідає варіант умов 2.2.1. Вироблене тут для варіанта 2.2.1 розв'язання відповідає варіанту 2 НФС, кращому за результатами аналізу живучості ненадлишкової БІКС. Це взаємно підтверджує правильність розроблених методів аналізу живучості й формування ФС БІКС.

В, сновк, я

Основним результатом даного дослідження є розробка методу формування ФС, що підвищують живучість БІКС. Метод базується на аналізі приналежності функцій задач БІКС різним множинам за наслідками відмов. У рамках методу введено поняття множин за наслідками, введені детерміновані, імовірнісні й комплексні оцінки наслідків об'єднань, описані й обґрунтовані одержання й систематизація даних, на підставі яких визначаються принципи формування ФС, сформульовані принципи формування ФС. Метод не залежить від закону розподілу імовірності відмов, що дозволяє застосовувати його з використанням іншого, ніж експоненціальний, закону розподілу. У цьому випадку можливе одержання іншої множини груп об'єднань, іншого розподілу об'єднань за групами і, відповідно, іншої пріоритетності об'єднань. Це пояснюється тим, що зміни в часі імовірнісних оцінок $P^{об}$ можуть мати інший характер, тоді будуть можливі інші якісні співвідношення $P^{об}$ й $P^{баз}$.

Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що вони дозволяють здійснювати спрямоване формування ФС БІКС на ранніх етапах проектування. Це, як і аналіз живучості БІКС, зменшує фінансові й часові витрати на розробку та можливу наступну доробку БІКС. Отримані результати дозволяють також проводити попередній якісний аналіз живучості БІКС шляхом перевірки відповідності ФС певним принципам їх формування.

Сп, сокялі2ера23р, я

1. Харченко В.С., Бородавка Н.П. Формализованное представление номинальной функциональной структуры для анализа живучести бортовых информационно-управляющих систем // *Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр. Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова*. – 2004. – Вип. 26. – С. 206-212.

2. Харченко В.С., Марков П.Е. Живучесть и безопасность систем управления летательных комплексов. Ч. 1. Основные понятия и модели. – Х.: МО України, 1995. – 109 с.

3. Urban G., Kolinowitz H.-J., Peleska J. A Survivable Avionics System for Space Application. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.informatic.uni-bremen.de/agbs/jp/papers/fics98.html>.

4. Al-Omari R., Manimaran G., Somani A. A Fault-Tolerant Dynamic Scheduling Algorithm for Multiprocessor Real-Time System. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.crhc.uiuc.edu/FTCS-29/pdfs/alomarir.pdf>.

5. Gupta I., Manimaran G., Siva Ram Murty C. Primary-Backup Based Fault-tolerant Dynamic Scheduling of Tasks in Multiprocessor Real-time Systems. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.crhc.uiuc.edu/FTCS-29/pdfs/gmani.pdf>.

6. Харченко В.С., Гридин Ю.В. Модель функционирования бортовых вычислительных систем с категорированием задач в условиях сбоев и отказов аппаратных и программных средств // *Космична наука і технологія*. – 1999. – Т. 5, № 5/6. – С. 103-109.

7. David Ph., Guidal C. Development of a Fault Tolerant Computer System for the Hermese Shuttle. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.informatic.uni-trier.de/~ley/db/conf/fics/fics93.html>.

8. Roques R., Correge A., Boleat C. Fault-Tolerant Computer for the Automated Transfer Vehicle. [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.informatic.uni-trier.de/~ley/db/conf/fics/fics98.html>.

9. Харченко В.С., Бородавка Н.П. Моделирование и анализ живучести бортовых информационно-управляющих систем по избыточной функциональной структуре // *Радиоэлектроника и информатика*. – 2005. – № 2. – С. 89-95.

10. Харченко В.С., Бородавка Н.П. Использование сетей Петри при проведении анализа живучести бортовых информационно-управляющих систем // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2006. – № 6. – С. 55-60.

11. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.

12. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними. – К.: Держстандарт України, 1995. – 124 с. – Введ. 01.01.96.

13. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.

14. Романкевич А.М., Карачун А.Ф., Романкевич В.А. Графологические модели для анализа сложных отказоустойчивых вычислительных систем // *Электронное моделирование*. – 2001. – Т. 23, № 1. – С. 102-111.

15. Глухов А.Д. Построение увеличителей и выбор структуры отказоустойчивых вычислительных систем // *Электронное моделирование*. – 2002. – Т. 24, № 2. – С. 77-83.

Надійшла до редколегії 7.08.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є Жуковського «ХАІ», Харків.