

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**РОМАНКЕВИЧ ВІТАЛІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ**

УДК 004.05

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ГАРАНТОЗДАТНОСТІ ВІДМОВОСТІЙКИХ БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ  
СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

Спеціальність 05.13.05 – комп'ютерні системи і компоненти

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Тарасенко Володимир Петрович**,  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
завідувач кафедри системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Додонов Олександр Георгійович**,  
Інститут проблем реєстрації інформації  
Національної академії наук України,  
заступник директора;

доктор технічних наук, професор  
**Харченко В'ячеслав Сергійович**,  
Національний аерокосмічний університет імені  
М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»,  
завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж;

доктор технічних наук, професор  
**Дрозд Олександр Валентинович**,  
Одеський Національний політехнічний університет,  
професор кафедри комп'ютерних інтелектуальних систем  
та мереж.

Захист відбудеться 29 січня 2018 р. о 14.30 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.02 у КПІ імені Ігоря Сікорського (м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 18, ауд. 516).

Відгуки на автореферат у двох екземплярах, завірені печаткою установи, просимо надсилати на адресу: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, вченому секретарю КПІ імені Ігоря Сікорського.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «27» грудня 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради  
кандидат технічних наук, доцент



М. М. Орлова

## ВСТУП

### Загальна характеристика роботи

**Актуальність теми.** З кожним роком все більша кількість обчислювальних систем і систем управління стають багатопроцесорними, що є безумовно перспективним явищем в плані універсальності при вирішенні багатьох складних задач з великою кількістю змінних, необхідність вирішення яких загострюється протягом останніх десятиліть. Не менш перспективні багатопроцесорні системи (БС) і в плані підвищення швидкодії та надійності їх технічних засобів. Один із шляхів підвищення надійності БС, що знайшов широке застосування у всіх країнах, що займаються розробкою складних технічних систем, є забезпечення їх відмовостійкості. Останнє є дуже важливим при побудові систем управління об'єктами критичного застосування, тобто таких, відмова яких загрожує серйозними наслідками. Створення подібних систем управління є досить складною науковою і практичною задачею.

Система управління складними об'єктами (космічні апарати, літаки, атомні електростанції) може включати в себе сотні різних датчиків, перетворювачів, вимірювальних пристроїв і комплексів, систем автоматики, каналів передачі інформації, а також багатопроцесорну систему, що складається з десятків або сотень, а іноді й тисяч, процесорів. Така багатопроцесорна система повинна забезпечувати вирішення великого комплексу завдань, причому в реальному часі, що вимагає певної надмірності для забезпечення необхідного рівня надійності при необхідній швидкодії. Крім того, одна з найважливіших вимог до подібних систем - забезпечення можливості взаємного тестування процесорів для встановлення тих, що вийшли з ладу, для того, щоб система була здатною продовжувати роботу в повному обсязі без них. Питання організації тестування і розрахунку надійності відмовостійких багатопроцесорних систем (ВБС) тісно переплітаються – без можливості встановлення стану процесорів системи (справний-несправний) говорити про надійність немає сенсу.

Згадані проблеми, а саме: забезпечення відмовостійкості, надійності, діагностованості є аспектами досліджень в теорії гарантоздатності, в рамках якої і подані результати даної дисертації.

Складність проблеми розрахунку характеристик надійності багатопроцесорних систем управління, особливо з нерегулярною структурою, може бути проілюстрована наступним чином: система може вийти з ладу при відмові певної множини процесорів, залишаючись повністю роботоздатною при відмові іншої, більшої за потужністю, множини своїх процесорів. Іншими словами, розрахунок характеристик надійності системи не піддається класичним методам розрахунку, які, зазвичай, орієнтовані на ситуації відмови об'єкта при відмові одного будь-якого компонента. Якщо до цього додати, що системи управління часто є ієрархічними, які складаються з декількох підсистем, що мають різні інтенсивності відмов, кожна з яких може складатися з різних процесорів, причому деякі з підсистем можуть мати спільні процесори, то складність проблеми стає зрозумілою. Відомі методи розрахунку для базових ВБС, тобто систем,

стійких до будь-яких відмов, кратність яких не перевищує певної величини. У роботі розглянуто створення універсального методу розрахунку ймовірності безвідмовної роботи для складних ВБС, в тому числі й таких, що не є базовими.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційні дослідження виконувалися на кафедрі системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках науково-дослідницьких держбюджетних робіт:

- «Розробка та дослідження системи верифікації проектних рішень для створення цифрових керуючих пристроїв», № держреєстрації 0101U000601 (2001-2003pp.);
- «Методи та засоби побудови тестопридатних цифрових об'єктів», № держреєстрації 0104U000686 (2004-2006pp.);
- «Методи та засоби оцінки надійності реконфігурованих відмовостійких багатопроцесорних систем», № держреєстрації 0107U002168 (2007-2009pp.);
- «Спеціалізована комп'ютерна система діагностування та розрахунку надійності реконфігурованих відмовостійких багатопроцесорних систем», № держреєстрації 0110U000262 (2010–2011 pp.).
- «Методи та засоби підвищення надійності та інформаційної стійкості багатопроцесорних систем для об'єктів критичного призначення», № держреєстрації 0113U000716 (2013-2014pp.);
- «Методи оцінки та забезпечення необхідного рівня технічної безпеки роботи спеціалізованих багатопроцесорних систем управління», № держреєстрації 0115U000323 (з 2015р.).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності розрахунку характеристик гарантоздатності відмовостійких багатопроцесорних систем управління складними об'єктами (у тому числі і критичного застосування) та підвищення ефективності їх самотестування.

Відповідно до поставленої мети *основними задачами дослідження* є наступні.

1. Розробка методів організації самотестування багатопроцесорних систем з різними топологіями.

- Для систем з шинною та матричною топологіями розробити методи оптимізації організації взамотестування процесорів за критерієм мінімізації часових витрат.
- Дослідити можливість організації паралельного взамотестування процесорів з метою мінімізації числа  $K$  процесорів, що тестують даний (аж до мінімуму  $K = 2$ ), допускаючи генезу нових діагностичних графів.
- Розглянути можливість організації послідовного тестування з метою мінімізації загального часу, який система витрачає на самотестування.

2. Створення нових моделей поведінки базових ВБС в потоку відмов для забезпечення можливості розрахунку їх характеристик надійності шляхом виконання статистичного експерименту.

- Побудувати базову математичну модель (тобто модель для базових ВБС) поведінки для найпростіших 2-відмовостійких ВБС і дослідити її властивості.
- Розробити метод формування базової графо-логічної моделі (*GL*-моделі) для загального випадку, дослідити її властивості та можливості, а також шляхи її оптимізації.

3. Розробка методів і алгоритмів модифікації *GL*-моделей для відображення реакції ВБС, що не є базовими, на появу відмов.

- Розробити метод і алгоритми трансформації базової моделі шляхом введення внутрішніх ребер в графі моделі. Дослідити особливості такої трансформації та обмеження, які виникають.
- Дослідити можливість трансформації моделей шляхом перетворення реберних функцій.

4. Розробка і розвиток методів і алгоритмів розрахунку ймовірності безвідмовної роботи (ЙБР) ВБС.

- Розробити модифікацію методу статистичних експериментів для розрахунку ЙБР з використанням *GL*-моделей.
- Розробити метод і алгоритм обчислення похибки, що виникає під час розрахунку ЙБР.
- Оптимізувати процес виконання експериментів за критерієм мінімізації часу.
- Дослідити можливість підвищення надійності ВБС за рахунок блокування відмови системи при появі деяких відмов підвищеної кратності.
- Дослідити можливість використання *GL*-моделей для розрахунку параметрів безпеки багатопроцесорних систем управління.

5. Розробка нових спеціалізованих керованих джерел потоку випадкових векторів стану ВБС, що забезпечують виконання статистичного експерименту з *GL*-моделями за доступний час.

- Запропонувати схему керованого генератора псевдовипадкових рівноважних векторів і дослідити його характеристики.
- Розробити автономний неповторний генератор псевдовипадкових рівноважних двійкових векторів.

*Об'єктом дослідження* є процеси розрахунку характеристик гарантоздатності відмовостійких багатопроцесорних систем та організації їх самотестування, а також моделі поведінки ВБС в потоку відмов.

*Предметом дослідження* методи та засоби забезпечення розрахунку характеристик роботи відмовостійких багатопроцесорних систем.

*Методи дослідження.* У відповідності з метою та зазначеними завданнями використовувалися основні положення наступних теорій: гарантоздатності; надійності цифрових схем і систем; обчислювальних систем; графів і теорії множин; булевих функцій і теорії лінійних автоматів; теорії діагностування багатопроцесорних систем;

теорії ймовірностей і математичної статистики; теорії проектування генераторів псевдовипадкових чисел і послідовностей.

**Наукова новизна одержаних результатів** визначається наступними положеннями.

Отримала подальший розвиток теорія діагностування багатопроцесорних систем. *Вперше* запропоновано метод організації самотестування ВБС з числом  $K=2$  процесорів, що тестують даний, на основі запропонованого діагностичного графа, названого структурно-регулярним, виконання тестових процедур і подальшого аналізу. Взаємотестування здійснюється паралельно і незалежно. Для  $m=2, 3$  і  $4$  число перевірок не перевищує  $2n+2$  ( $m$  - число допустимих несправностей,  $n$  - кількість процесорів системи). Метод узагальнений для випадку довільного  $m < n/2$  і  $K=m$ , перевірки здійснюються послідовно, і їх загальна кількість не перевищує величини  $n + 2m$ .

Для інших топологій *вперше* запропоновано метод підвищення ефективності самотестування ВБС за критеріями мінімальності апаратурних і часових витрат, знайдені співвідношення, що дозволяють обрати оптимальні значення коефіцієнта зв'язності.

*Вперше* запропоновано принцип створення моделей, що відображають поведінку ВБС в потоці відмов, які названі *GL*-моделями і використання яких дозволяє здійснювати розрахунок ЙБР системи статистичними методами. Досліджено основні особливості і властивості базової моделі для 2-відмовостійкої БС і *вперше* визначені нижня і верхня границі потужності множини векторів стану, поява яких викликає втрату двох ребер в моделі, що важливо для аналізу можливостей її подальшого перетворення. Для випадку довільних значень  $m$  і  $n$  запропоновано метод мінімізації *GL*-моделей, що призводить до значного спрощення моделі зі збереженням її адекватності. Метод дозволяє будувати модель з мінімізацією випадуючих ребер (МВР-модель), що втрачає мінімальну кількість ребер при появі  $m+1$  відмови. Запропоновано метод пошуку оптимальної за різними критеріями базової моделі.

Досліджена задача перетворення базової *GL*-моделі для забезпечення її адекватності небазовій ВБС шляхом введення внутрішніх ребер в циклічний граф *GL*-моделі. *Вперше* вирішено завдання мінімізації числа внутрішніх ребер, отримані верхня і нижня границі кількості додаткових ребер в залежності від числа ребер базової моделі і потужності множини векторів стану системи, які відрізняють її від базової. Проаналізована проблема, що пов'язана з виникненням попарних реберних циклів (ПРЦ), які ускладнюють перетворення моделі. *Вперше* встановлені теоретичні границі кількості ПРЦ, запропоновані методи зменшення їх числа. Запропоновано метод побудови моделі, що має ту ж кількість основних ребер, що й МВР-модель, та вільна від ПРЦ.

Досліджено інший шлях перетворення моделей - модифікація реберних функцій. Для *GL*-моделі 2-відмовостійкої БС *вперше* запропоновано метод трансформації моделі, яка адекватно відображає поведінку системи при появі довільного заданого

числа векторів (блокування векторів) стану системи з трьома відмовами. Для загального випадку *вперше* запропоновано метод, заснований на перетворенні однієї реберної функції і аналізі залежності між її модифікацією і множиною векторів, які потрібно блокувати. Виводяться відповідні співвідношення.

Вирішено задачу розрахунку ймовірності безвідмовної роботи системи, який виконується на основі статистичних експериментів з *GL*-моделями і з використанням керованих генераторів псевдовипадкових двійкових векторів. *Вперше* запропоновано модифікації методу статистичних експериментів, які враховують особливості побудови відмовостійких багатопроесорних систем, зокрема, ступінь неоднорідності системи, різну інтенсивність відмов компонентів, ієрархічність ВБС, наявність різних підсистем, у тому числі таких, які мають спільні елементи, ступінь їх відмовостійкості, особливості *GL*-моделей, що використовуються. Отримано формули оцінки ймовірності безвідмовної роботи ВБС за заданий проміжок часу.

Проаналізовано причини та види похибки, отримані співвідношення для оцінки окремих її видів (методичної, трансформованої похибки і похибки округлення), а також сумарної похибки. *Вперше* запропоновано проводити статистичний експеримент поетапно, використовуючи кероване неповторне джерело рівноважних векторів, що відображають стан системи на кожному етапі. Показано, що задачу мінімізації похибки можна звести до знаходження умовного екстремуму функції, де умовою є обмеження загальної кількості статистичних випробувань для всіх етапів моделювання. *Вперше* отримані співвідношення, що дозволяють визначити кількість випробувань для кожного етапу моделювання, що забезпечують мінімум похибки при оцінці ймовірності безвідмовної роботи ВБС.

Класифіковані шляхи підвищення надійності ВБС. *Вперше* запропоновано метод підвищення надійності за рахунок блокування відмови ВБС при появі деякої множини векторів стану системи з підвищеною кратністю відмов за рахунок використання внутрішніх резервів, отримана оцінка кількості таких векторів. Перевага методу - у відсутності необхідності введення додаткових процесорів. *Вперше* запропоновано метод оцінки функціональної (технічної) безпеки багатопроесорних систем управління на основі виконання статистичних експериментів з модернізованою *GL*-моделлю, запропоновано оцінювати її як ймовірність переходу системи в один з небезпечних станів. Отримані відповідні співвідношення.

*Вперше* запропонована схема нелінійного генератора потоку рівноважних двійкових векторів стану ВБС, що аналізується, для забезпечення можливості виконання статистичних експериментів з моделями її поведінки в потоку відмов. За рахунок введення спеціальної комбінаційної схеми управління процесом зсуву в вихідному регістрі досягнуто підвищену швидкодію; недоліком є повторення деяких векторів в процесі генерації. *Вперше* сформульована нова ідея побудови на основі регістру зсуву автономного неповторного джерела рівноважних двійкових векторів, яка полягає в затримці, тобто виключення з процесу зсуву певного розряду вихідного регістра генератора в певні моменти часу, що визначається спеціальною функцією

управління, що залежить від змінних, якими є розряди регістра. Доведено, що така функція завжди існує для будь-яких значень ваги і довжини.

**Практичне значення одержаних результатів** визначається тим, що запропоновано і досліджено ряд методів, моделей, алгоритмічних та апаратно-програмних засобів, які дозволяють підвищити ефективність проектування і функціонування багатопроцесорних систем управління (в першу чергу відмовостійких) за рахунок поліпшення їх характеристик, зокрема, тестування, надійності та функціональної безпеки, а також розрахунку надійності шляхом виконання статистичних експериментів з *GL*-моделями з використанням запропонованих генераторів псевдовипадкових векторів.

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи можуть бути використані в організаціях, які займаються проектуванням, експлуатацією та оцінкою показників гарантоздатності відмовостійких багатопроцесорних обчислювальних систем і систем управління складними об'єктами. Запропоновані методи взаємотестування процесорів в системах зі структурно-регулярним діагностичним графом вже використовуються в наукових дослідженнях Інститут проблем математичних машин і систем НАН України.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в курсі лекцій «Тестування, надійність, контроль та діагностика комп'ютерних систем» та «Комп'ютерна логіка, частина 3. Прикладна теорія цифрових автоматів».

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, які наведені в дисертації отримані автором самостійно. В опублікованих у співавторстві роботах дисертанту належать наступні результати. Ідея і метод організації самотестування БС на основі конструктивно регулярних діагностичних графів для паралельного та незалежного тестування з  $K=2$  і  $4 \geq m$  [1, 59], а також при послідовному тестуванні з  $m < n/2$  і  $K=m$  [50] для мінімізації сумарного часу, який система витрачає на самотестування, метод оптимізації самотестування БС з шинною і матричною топологіями зв'язків за критерієм мінімізації апаратурно-часових витрат при паралельному тестуванні [9, 12, 15]. Ідея і методи створення *GL*-моделей поведінки базових ВБС [56-58, 60] в потоку відмов для випадку  $m=2$  [42, 47, 53] і для випадку довільного  $m < n$  [30, 35, 37, 49], їх мінімізації [36, 41] та отримання ряду теоретичних граничних оцінок [31, 33, 64]. Ідея і методи перетворення [38, 46, 54, 60] базових *GL*-моделей шляхом введення в граф моделі додаткових ребер [11, 27-29] і шляхом перетворення реберних функцій [3, 5, 7, 19, 51], а також отримання ряду граничних оцінок [34, 39] перетворення для моделей 2-відмовостійких БС і моделей  $m$ -відмовостійких БС [21, 29]. Модифікація методу статистичних експериментів [10, 17, 18, 40, 43, 45] для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи ВБС, оцінки похибки, що виникає при розрахунку [4, 22, 26], та мінімізації часу виконання статистичного експерименту [24, 55]. Метод підвищення



надійності ВБС за рахунок внутрішніх резервів системи [23], метод розрахунку ймовірності переходу системи в небезпечний стан [2, 6, 13, 14, 48]. Метод побудови генератора потоку векторів стану ВБС [20, 25, 32, 44, 52, 63], призначеного для виконання статистичних експериментів з *GL*-моделями, метод побудови автономного неповторного генератора рівноважних двійкових векторів [8, 16, 61-63].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на 43 науково-технічних конференціях, з них 15 – міжнародних:

- 15-й ÷ 19-й Международной научно-практической конференции SAIT, УНК «ИПСА» Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (2013 – 2017 pp.);
- 13-й ÷ 26-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті», м. Алушта (2001 – 2013 pp.);
- 3-й міжнародній науково-практичній конференції «Методи та засоби кодування, захисту та ущільнення інформації», м. Вінниця, травень 2011р.;
- IX Міжнародній науково-технічній конференції CSNT 2016, м. Київ (21– 23 квітня 2016 р.);
- Всеукраїнській науково-практичній конференції «Комп'ютерні системи і проектування технологічних процесів та обладнання», м. Чернівці (17– 19 лютого 2016 р.);
- II всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів, Івано-Франківськ, 2015 р.;
- Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія», м. Вінниця, ВНТУ (2014, 2010 pp.);
- Abstracts of Scientific Information for society – from Today to the Future (CODATA-21). Ukraine, Kyiv (October 5 – 8, 2008);
- Proceedings of IEEE East-West Design & Test International Symposium (2008 - Ukraine, L'viv; 2007 – Armenia, Yerevan; 2006 – Russia, Sochi; 2005 – Ukraine, Kharkov; 2004 - Ukraine, Kharkov);
- Международной научной конференции, посвящённой памяти проф. А.М.Богомолова «Компьютерные науки и информационные технологии», г. Саратов (2007 г.);
- 5-й, 7-й и 8-й Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии» СИЭТ, Одесса (2004, 2006, 2007 гг.);
- Прикладна математика та комп'ютинг, м. Київ (2009, 2010, 2011, 2012 pp.);
- 5-й ÷ 6-й міжнародних науково-практичних конференціях «Гарантоздатні (надійні та безпечні) системи, сервіси та технології» (2010 – Кіровоград, 2012 – Севастополь, 2014 – Київ).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 96 наукових працях, серед яких 47 статей у наукових фахових виданнях (в тому числі 6 статей у закордонних наукових періодичних виданнях та 9 статей у наукових фахових виданнях України, що включені до наукометричних баз даних), 43 публікації в

збірниках тез доповідей науково-технічних конференцій (15 з яких - міжнародні);  
6 свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.

## Основний зміст роботи

**Перший розділ** дисертації присвячено аналізу відомих рішень задачі розрахунку показників надійності - одного з найважливіших параметрів цифрових схем і систем. Розглядаються різні характеристики, які визначають надійність в техніці, і наголошується, що найбільш важливою і поширеною з них є ймовірність безвідмовної роботи за певний проміжок часу. Це відноситься і до відмовостійких багатопроцесорних систем. Розглядаються найбільш відомі способи опису ВБС, які використовуються при розрахунку характеристик надійності, відзначається (слідом за багатьма джерелами) їх обмежена ефективність.

Особлива увага приділяється системам типу *k-out-of-n* і деяким їх класам, зокрема, аналізуються системи *k-out-of-n:G* і *k-out-of-n:F*, а також *consecutive-k-out-of-n* і *weighted-k-out-of-n* системи. Розглядаються найбільш відомі методи розрахунку ймовірності безвідмовної роботи подібних систем, зокрема, методи Рушді та Белфора, метод Барлоу-Хайдтмана, а також можливість використання для розрахунку дерева відмов. Наголошується, що кожний з цих методів має свою область застосування, а універсальні методи, як відзначають самі автори, занадто складні у використанні.

Розглядаються також питання організації самотестування багатопроцесорних систем в аспекті тісного взаємозв'язку з проблемою забезпечення необхідного рівня надійності ВБС.

### Другий розділ дисертації

Самотестування багатопроцесорних систем - одне з найбільш важливих завдань, яке система повинна вирішувати постійно, тобто система повинна в кожен момент часу знати стан справності всіх своїх компонентів, бо від цього залежить достовірність отримуваних результатів. Складність вирішення задачі організації взаємного тестування процесорів визначається різними обставинами: для різних процесорів повинні бути різні тести, різний час тестування, організація самого тестового експерименту в цілому, достовірність кожної перевірки (адже тестуючим може бути і несправний процесор) та інші. Слід пам'ятати, що процес взаємотестування, який би метод не був взятий за основу, вимагає певного часу, протягом якого можуть з'явитися нові відмови, і це - одна з причин прагнення всіх розробників зменшити час тестування.

У загальному випадку відмовостійка система містить  $n$  процесорних елементів (ПЕ) з певною топологією міжпроцесорних зв'язків. Виходячи, наприклад, з необхідної здатності до виявлення процедур самотестування кожному з  $n$  ПЕ ставиться у відповідність деяка підмножина потужності  $k - 1$  ПЕ, які тестують даний ПЕ. Таким чином, у складі  $n$  елементів ВБС формується  $n$  груп по  $k$  ПЕ в кожній. Зрозуміло, що оптимізація визначення значення величини  $k$  в загальному випадку залежить від декількох параметрів і представляє собою окрему (іноді досить складну) задачу.

Можлива топологія зв'язків ПЕ може відповідати шинній структурі (рис. 1), коли  $n$  процесорних елементів  $P_1 \div P_n$  пов'язані  $m$  магістралями  $b_i$ , що використовуються як

в системному режимі роботи ВБС, так і при виконанні процедур взаємного тестування компонентів системи.

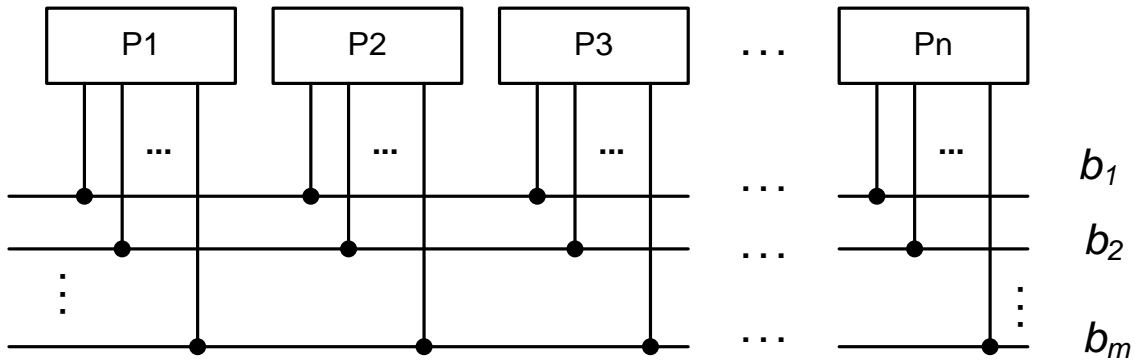


Рис. 1. Топологія зв'язків ПЕ

Ставиться задача розподілу  $n$  ПЕ БС по групах і їх подальший розподіл по магістралях, коли кожній магістралі  $b_1, b_2 \dots b_m$  ставиться у відповідність деяка підмножина груп ПЕ.

При паралельному тестуванні груп ПЕ з урахуванням наявності  $m$  магістралей число циклів повного тестування  $c = n/m$ . Що стосується безпосередньої організації процесу тестування в групах з  $k$  ПЕ, то цей процес можна представити у вигляді ряду часових інтервалів, сукупність яких складає кадр (інтервал) самотестування  $T_{st}$ , такий, що:

$$T_{st} = t_{Ip} + n \cdot m \cdot t_{ch} + \frac{n}{m} \cdot t_{rs} \cdot (k-1) + t_{eq} \cdot (k-1) + \frac{n}{k \cdot m} \cdot t_{rr} \cdot (k-1) \cdot (k-2) + t_{res}.$$

Співвідношення (1) складено з урахуванням паралельного тестування в групах і містить наступні компоненти:

$t_{Ip}$  – час виконання процедури самоперевірки одного ПЕ ВБС;

$t_{ch}$  – витрати часу на зчитування сигнатури (результату самотестування) кожного з ПЕ, що тестуються. Ця сигнатура повинна бути порівняна з її еталонним значенням;

$t_{rr}$  – час обміну результатами порівняння сигнатур з еталоном для  $(k - 1)$  тестуючих ПЕ в групах;

$t_{res}$  – час формування результату самодіагностування (наприклад, у вигляді інтегрального критерію «справно/несправно»).

В якості критерію оптимізації процесу тестування в ВБС вибираємо, як мінімум  $T_{st}$ . Беручи похідну і вирішуючи отримане рівняння, знаходимо

$$m_{opt} = \sqrt{\frac{k \cdot t_{rs} \cdot (k-1) + t_{rr} \cdot (k-1)(k-2)}{k \cdot t_{ch}}}.$$

Далі оцінено величину  $m'_{opt}$ , яка враховує як часові  $T_{st}$ , так і структурні  $L_{st}$  витрати на діагностування

$$m'_{opt} = \sqrt{\frac{n \cdot k \cdot t_{rs} \cdot (k-1) + t_{rr} \cdot (k-1)(k-2)}{n \cdot t_{ch} + T(m=1)}}.$$

Проаналізована також і альтернативна задача: отримані співвідношення для вибору величини  $m$ , які дозволяють забезпечити задане *a priori* значення  $T_{st}$  або  $L_{st}$ .

У розділі розглянуто також і інший тип архітектури зв'язків у БС, а саме, коли кожний процесор  $P_i$  пов'язаний з  $r$  іншими процесорами (рис. 2). Для того ж комплексного критерію, який враховує часові та структурні витрати, показано, що оптимальним значенням коефіцієнта зв'язності буде величина

$$r(T,L) = \sqrt{\frac{(k-1)(t_{rs} + \frac{k-2}{k}t_{rr})2L_{max}^m}{T_{max}^m (l_{ch} + 2l_{in})}}$$

де  $T_{max}^m$  і  $L_{max}^m$  – це відносні безрозмірні величини для випадків, коли ПЕ мають мінімальне  $r = 2$  і, відповідно, максимальне  $r = n - 1$  значення.

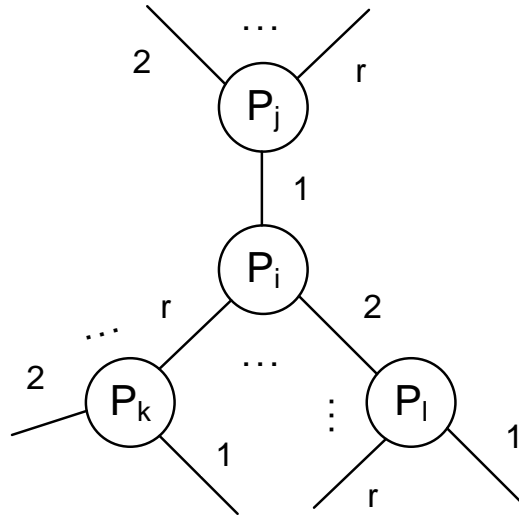


Рис. 2. Приклад довільних зв'язків з  $r$  процесорами

Розглянута також задача розподілу процесорів по групах, про які йшлося вище. З метою забезпечення рівномірного навантаження з тестування запропонований алгоритм розподілу, що приводить до діагностичного графу (який може бути частиною графу зв'язків системи), в якому кожний процесор тестує  $K$  процесорів і сам тестується  $K$  іншими процесорами. Алгоритм заснований на представленні БС за допомогою матриць-циркулянтів.

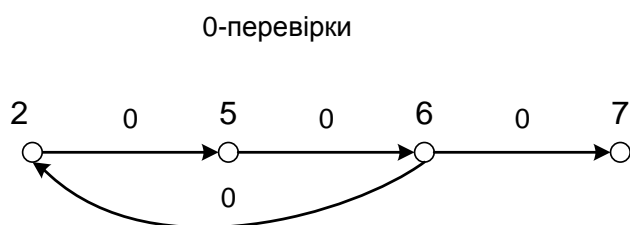
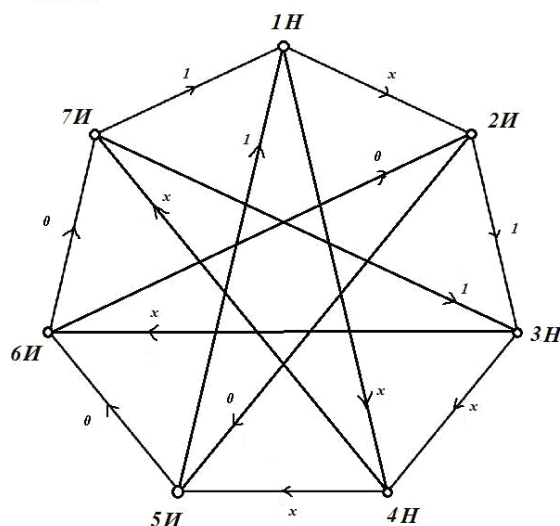
Далі запропонований метод організації самотестування БС для випадку  $K = 2$  ( $K$  – число процесорів, що тестують даний). Метод призводить до мінімізації кількості елементарних перевірок при певних обмеженнях:

- граф діагностичних зв'язків – конструктивно регулярний, тобто такий, у якого зв'язки однотипні, і кожна вершина має 4 інцидентні **різні** дуги: 2 вхідні та 2 вихідні;
  - допустима кількість  $T$  несправних модулів (процесорів) обмежена.
- Розглядаються випадки  $T \leq 4$ ;

- орієнтація на ПМЧ модель (метод Препарата-Метца-Чена).

Суть метода – виконання всіх перевірок і подальший аналіз з використанням певних *положень*, сформульованих у дисертації. Доведено *твердження*: існують такі конструктивно регулярні діагностичні графи, що для встановлення стану процесорів системи з параметрами  $n \geq 7$  і  $T=3$  достатньо, крім основних перевірок (2 перевірки на процесор), не більше однієї додаткової перевірки процесора, стан якого не визначено. Доведення проведено на основі графу  $G(1,3)$  з аналізом всіх векторів можливого взаємного розташування справних (И) та несправних (Н) процесорів. Прикладом може служити граф, наведений на рис. 3.

Вектор 4



1-перевірки

7,1  
5,1  
7,3  
2,3

Аналіз

7=И  $p_7=4$   
1=Н  
3=Н  
2=И  $p_2=3$   
5=И  $p_5=3$   
6=И  $p_6=3$

Стан вершини 4 не визначено

Рис. 3. Граф  $G(1,3)$ , тестування і аналіз для вектора 1110010

Тут  $P$  – вага вершини (кількість модулів, включаючи даний, що підходять до нього 0-ланцюжками). Далі доведено наступне *твердження*. Існують такі конструктивно регулярні діагностичні графи, що для встановлення стану процесорів системи з параметрами  $n \geq 9$  і  $T = 4$  достатньо, крім  $2n$  основних перевірок, не більше 2-х додаткових. Відмітимо, що такі графи можуть бути побудовані для будь-якої кількості процесорів, що можливо не для всіх видів широко вживаних комутаторів (гіперкуб, матричний).

Наприкінці розділу наведено узагальнення запропонованого методу для більшої кількості допустимих несправностей. Доводиться, що в БС, що має конструктивно регулярний діагностичний орграф з однотипними  $m$  вихідними і  $m$  вхідними різними

зв'язками у кожній вершині, і в якій допускається не більше  $m < n/2$  відмов, для встановлення стану всіх процесорів досить  $S \leq n + 2m$  перевірок.

В **третьому розділі** розглянуто та проаналізовано моделі, які відображають поведінку ВБС в потоці відмов. Такі моделі можуть служити для розрахунку надійнісних характеристик ВБС. Відзначено, що відомі методи розрахунку мають свої недоліки: занадто складні для практичного застосування (двополюсні моделі), вузька область застосування (методи Рушді та Белфора придатні лише для базових ВБС) або спеціалізація (методи розрахунку для небазових k-out-of-n систем з певними властивостями), неуніверсальність (дерево відмов, мало придатне для систем з ієрархічною структурою) та інші. Зазначені недоліки призводять до необхідності розробки нових моделей, які були б простими і універсальними. У розділі запропоновані такі моделі, які нами названі графо-логічними моделями (або *GL*-моделями). Відмінною рисою цих моделей є спільне використання властивостей графів і булевих функцій.

Відмовостійка багатопроцесорна система, що має  $n$  процесорів і зберігає роботоздатність у разі відмови не більше, ніж  $m$  будь-яких її процесорів ( $0 \leq m < n$ ), будемо позначати  $K(m, n)$  і назвемо базовою ВБС.

Графо-логічна модель (далі *GL*-модель) відмовостійкої багатопроцесорної системи, що включає  $n$  елементів, представляє собою в загальному випадку неорієнтований граф  $G$ , кожному ребру якого приписується булева функція. Змінними цих функцій є індикаторні змінні  $x_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), що дорівнюють 1 ( $i$ -й елемент системи роботоздатний) або 0 ( $i$ -й елемент системи вийшов з ладу). Ребро видаляється з графу, коли реберна функція, що відповідає йому, приймає значення 0. Зв'язність графа моделює роботоздатність системи. У розділі розглядаються моделі, засновані на циклічних графах.

Спочатку досліджені властивості більш простих моделей, а саме моделей  $K(2, n)$ . Реберні функції моделі мають вигляд

$$h_i = x_i \vee \prod_{j=1, [\frac{n-1}{2}]} x_{g(i+j) \bmod(n)}$$

В роботі показано, що граф  $G$  втрачає зв'язність, якщо і тільки якщо не менше трьох змінних з множини  $\{x_i, \dots, x_n\}$  приймають нульові значення. Особливістю даної моделі є втрата двох або трьох ребер при появі різних векторів стану ВБС (векторів, компонентами яких є стани процесорів) з трьома нульовими компонентами, що має значення при перетворенні моделі. Визначено відповідні границі:  $V_e$  - верхня границя потужності множини  $Q$  векторів стану з трьома нульовими компонентами, поява яких призводить до втрати *GL*-моделлю двох ребер;  $V_n$  - нижня границя множини векторів стану з трьома нулями - потужність мінімальної множини векторів стану  $M$ , для якої неможливо побудувати модель, таку, що при появі будь-якого вектора стану з  $M$ , граф моделі втрачає 2 ребра. Показано, що ці границі мають вигляд:

$$V_n = \begin{cases} \frac{3}{8} \cdot n \cdot (n - 2) + 1, & \text{для парних } n, \\ n - 2, & \text{для непарних } n; \end{cases}$$

$$V_n = n \cdot C_{\lfloor \frac{n}{2} \rfloor}^2$$

Ідея методу побудови моделі  $K(m,n)$ , полягає в наступному. Процесори і відповідні їм змінні розбиваються на кілька груп. Для кожної групи будується своя модель  $K_i(m_i, n_i)$ , що враховує можливий розподіл відмов по групах. Наприклад, модель  $K(3,7)$  може бути представлена наступною сукупністю моделей меншої розмірності при розбитті змінних на 2 групи:

| $\{x_1, x_2, x_3, \}$ | $\{x_4, x_5, x_6, x_7\}$ |
|-----------------------|--------------------------|
| $K'(3,3)$             |                          |
| $K'(2,3)$             | $K'(1,4)$                |
| $K'(1,3)$             | $K'(2,4)$                |
|                       | $K'(3,4)$                |

Кожна з моделей меншої розмірності реалізується за тим же принципом і представляється в загальній моделі своєю сукупністю ребер. Наприклад, для  $K(2,3)$  можна побудувати таким чином:

| $\{x_1, x_2\}$ | $\{x_3\}$ |
|----------------|-----------|
| $K'(2,2)$      |           |
| $K'(1,2)$      | $K'(1,1)$ |

Таке розкладання по змінним проводиться до появи моделей виду  $K'(1,r)$  і  $K'(r,r)$ , реберні функції яких формуються як кон'юнкція та диз'юнкція  $r$  змінних відповідно. Підмоделі виду  $K'$  одного рядка в таблиці об'єднуються знаками диз'юнкції з урахуванням всіх їх можливих комбінацій. Для кожної комбінації формується своя функція і своє ребро. В роботі строго доведена адекватність отриманої моделі. Для цієї моделі запропоновано метод мінімізації, заснований на наступному *твердженні* склеювання.

*Твердження 1.* Ребра  $r_1$  і  $r_2$  (разом з функціями  $F_1$  і  $F_2$ ) можна замінити одним ребром  $r_3$  з функцією  $F_3$  (навіть у тому випадку, якщо функції  $F_1$  або  $F_2$  вже брали участь у склеюванні):

$$\left. \begin{array}{l} F_1 = A \vee \varphi_1 \\ F_2 = A \vee \varphi_2 \end{array} \right\} \Rightarrow F_3 = A \vee \varphi_1 \cdot \varphi_2$$

Наводиться алгоритм виконання мінімізації, який дає можливість отримання моделі, яка втрачає мінімальну кількість ребер при появі  $m + 1$  відмови (МВР-модель).



Ефективність методу можна побачити на прикладі мінімізації моделі  $K(3,8)$ : вихідна модель має 10 ребер і загальну складність реберних функцій – 56 операцій, МВР-модель – 6 ребер і 40 операцій. Для МВР-моделі запропоновано встановлення ієрархії реберних функцій, яка ілюструється деревом ієрархії, яке для випадку  $m = 3$  перетворюється в бінарне. Ієрархія визначається потужністю множини змінних, від яких залежить реберна функція. Для прикладу зупинимося на МВР-моделі  $K(3,13)$ , реберні функції якої мають вигляд:

$$f_1 = (x_1 \vee x_2)(x_1 x_2 \vee x_3)(x_1 x_2 x_3 \vee x_4 x_5 x_6)(x_4 \vee x_5)(x_4 x_5 \vee x_6) \vee x_7 x_8 x_9 x_{10} x_{11} x_{12} x_{13}$$

$$f_2 = (x_7 \vee x_8)(x_7 x_8 \vee x_9)(x_7 x_8 x_9 \vee x_{10} x_{11} x_{12} x_{13})(x_{10} \vee x_{11})(x_{12} \vee x_{13})(x_{10} x_{11} \vee x_{12} x_{13}) \vee x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6$$

$$f_{11} = (x_1 x_2 \vee x_3)(x_1 \vee x_2) \vee x_4 x_5 x_6$$

$$f_{12} = (x_4 x_5 \vee x_6)(x_4 \vee x_5) \vee x_1 x_2 x_3$$

$$f_{21} = (x_7 x_8 \vee x_9)(x_7 \vee x_8) \vee x_{10} x_{11} x_{12} x_{13}$$

$$f_{22} = (x_{10} \vee x_{11})(x_{12} \vee x_{13})(x_{10} x_{11} \vee x_{12} x_{13}) \vee x_7 x_8 x_9$$

$$f_{111} = x_1 \vee x_2 \vee x_3$$

$$f_{121} = x_4 \vee x_5 \vee x_6$$

$$f_{211} = x_7 \vee x_8 \vee x_9$$

$$f_{221} = x_{10} \vee x_{11} \vee x_{12} x_{13}$$

$$f_{222} = x_{10} x_{11} \vee x_{12} \vee x_{13}$$

Дерево ієрархії реберних функцій представлено на рис. 4.

Проаналізовано найбільш практично важливі критерії якості моделей та запропоновано метод пошуку оптимальної моделі, який базується на описаному методі мінімізації.

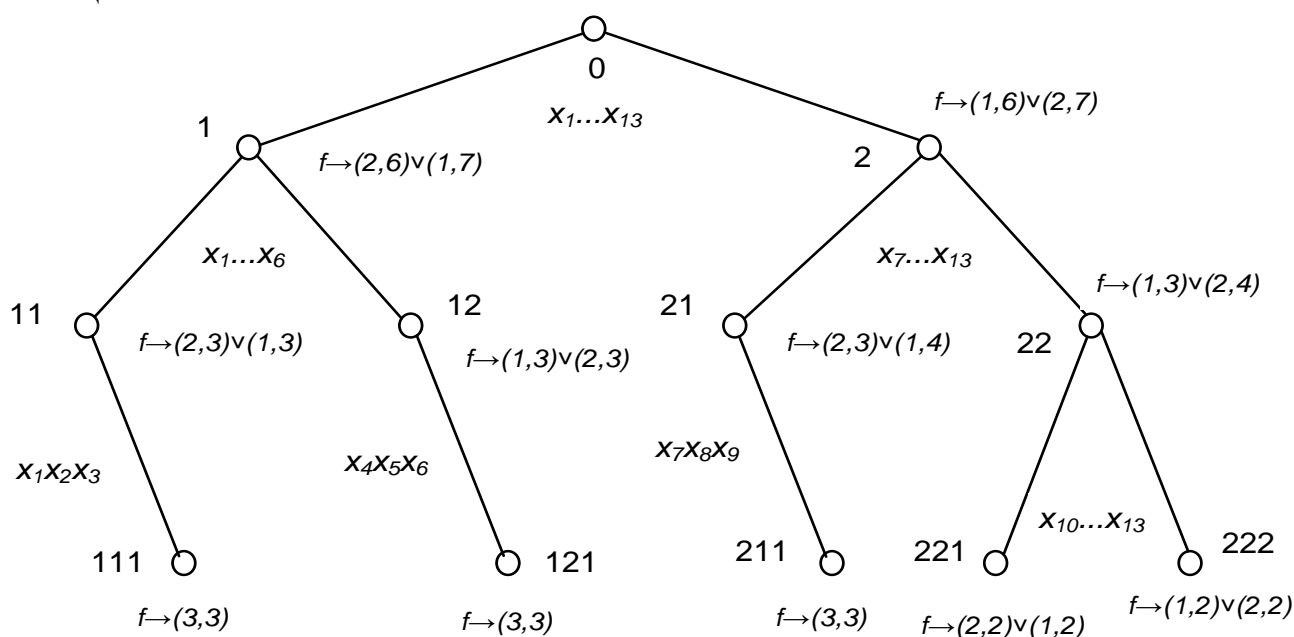


Рис. 4. Дерево ієрархії реберних функцій

Запропоновано метод побудови нециклічної  $GL$ -моделі, що представляє собою багаторівневу сукупність чотириреберних графів. Коміркою нової моделі, що отримала назву МУ-моделі, є граф виду, що представлено на рис. 5.

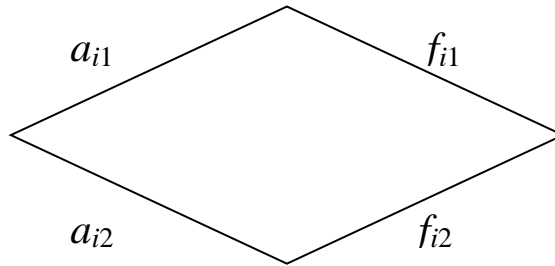


Рис. 5. Елемент МВР-моделі

На рис. 5 функції  $f_{i1}$  і  $f_{i2}$  – реберні функції МВР-моделі, які залежать від одних і тих самих змінних;  $a_{i1}$  і  $a_{i2}$  – реберні функції нової моделі, які відображають стан графів наступного рівня ієрархії. Основною перевагою багаторівневої моделі є відсутність попарних реберних циклів, які ускладнюють перетворення МВР-моделі.

Розглянута ВБС, що складається з декількох підсистем і має деяку множину процесорів, які можуть бути додані будь-якій з підсистем (ковзний резерв) у разі виходу з ладу в них одного або кількох власних процесорів, що, взагалі кажучи, виключає можливість розглядати систему та її модель як базову: кожна підсистема може мати власну ступінь відмовостійкості. Запропоновано метод, результатом застосування якого є представлення  $GL$ -моделі такої системи як сукупності, що складається з  $N + 1$  базових моделей, де  $N$  – кількість підсистем, що полегшує розрахунок надійності. Суть методу полягає у використанні значень реберних функцій допоміжних МВР-моделей, побудованих для кожної з підсистем, спільно зі змінними стану резервних процесорів для формування вектора стану, що подається на вхід моделі верхнього рівня. Використовується основна властивість МВР-моделей: завжди втрачається на одне ребро більше, ніж різниця між числом процесорів, що відмовили, і ступенем відмовостійкості системи.

У **четвертому розділі** розглянуто перетворення моделей. Реальні ВБР далеко не завжди є базовими, зокрема, конкретна ВБС може володіти або більшим, або меншим ступенем відмовостійкості по відношенню до базової. Наприклад, ВБС може функціонувати в більшості випадків 2-кратних відмов її модулів, однак на певній множині векторів стану, що містять два нулі, вона відмовляє, в той же час, залишаючись роботоздатною на деяких векторах станів системи, що мають 3 або навіть 4 нулі. Такі умови визначаються конкретними міркуваннями, вимогами, конфігурацією системи, характеристиками модулів (зокрема продуктивністю, які розглянуто в розділах 5 і 6), їх можливостями виконання функцій інших модулів в процесі реконфігурації та іншими факторами. Зрозуміло, що для адекватного відображення поведінки системи в потоці відмов базова модель повинна бути перетворена. У

дисертації розглянуто два шляхи трансформації: проведення додаткових ребер в графі моделі та зміна реберних функцій.

Нехай  $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots\}$  – множина деяких векторів стану системи, що мають зайву нульову компоненту і при появі яких система зберігає роботоздатність. У графі  $R$  базової МВР-моделі поява кожного такого вектора призводить до зникнення пари ребер. Множину таких пар позначимо через  $L$ , а його потужність – через  $l$ . Для відображення на моделі збереження роботоздатності системи в ній можна провести додаткові ребра. Особливістю базової моделі, побудованої на основі циклічного графа, є наступне: *ребра моделі разом зі своїми функціями можна довільно переставляти.*

Дві або більше непусті підмножини основних ребер, що не перетинаються, назвемо  $S$ -підмножинами, якщо зв'язність графа зберігається при втраті будь-якої пари ребер, що належать різним підмножинам, і якщо зв'язність графа порушується при втраті будь-якої пари ребер, що належать будь-якій з підмножин, що містить більше одного ребра. Нехай  $p$  – кількість  $S$ -підмножин, а їх потужності відповідно  $S_1, S_2, \dots, S_p$ .

Визначимо граф  $V: V = \{A, L\}$ , тобто множині вершин відповідає множина ребер  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_r\}$  графа  $R$  МВР-моделі, а ребра відповідають множині  $L$ . Вершини  $a_i$  і  $a_j$  в графі  $V$  будуть суміжними, якщо відповідні їм ребра графа  $R$  утворюють пару з множини  $L$ . Фактично  $S$ -підмножини графа  $R$  є внутрішньо стійкими множинами вершин графа  $V$  і, отже, завдання пошуку  $S$ -підмножин можна звести до задачі розфарбування вершин графа  $V$  (рис. 6).

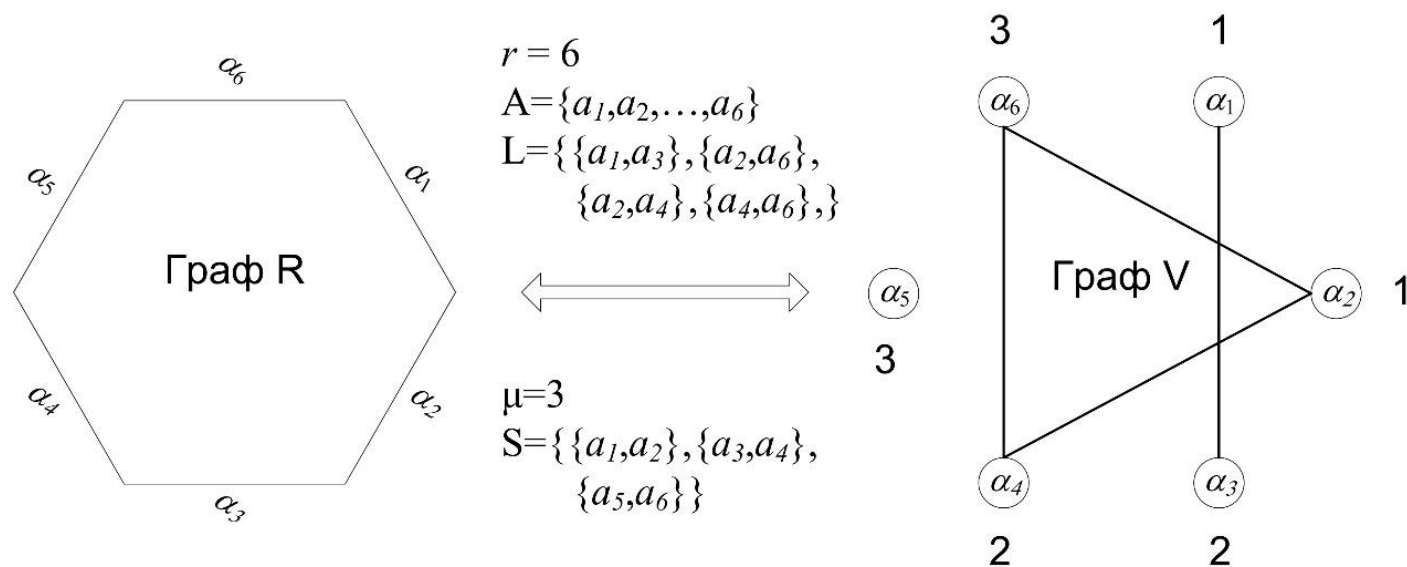


Рис. 6. Приклад розфарбування графа  $V$

Розфарбування графа  $V$  дозволяє знайти самі  $S$ -підмножини і визначити їх мінімальну кількість  $p_{min}$ . Позначимо через  $e$  необхідну і достатню кількість

додаткових ребер, проведення яких утворює  $p = p_{min}$   $S$ -підмножин. Показано наступне:

$$e = [(p + 1) / 2].$$

У роботі наводиться алгоритм проведення додаткових ребер після побудови МВР-моделі.

1. Побудувати граф  $V$  на основі множин  $A$  і  $L$ .
2. Виконати розфарбування вершин графа  $V$ .
3. Вершини  $V$ -графа (тобто ребра вихідного графа  $R$ ), які мають один колір, об'єднати в одну  $S$ -підмножину.
4. Побудувати циклічний граф  $S^*$ , який складається з  $p$  ребер, що відповідають  $S$ -підмножинам  $\{S_1, S_2, S_3, \dots, S_p\}$ .
5. Провести  $e$  додаткових ребер, з'єднуючи вершини графа  $S^*$  попарно.

На етапі проектування системи та її моделі, а також внесення до неї змін, розробнику необхідно знати границі числа додаткових ребер, що вводяться для забезпечення адекватності моделі. З іншого боку, інтерес представляють границі, в яких може знаходитись кількість векторів, які блокуються заданим числом додаткових ребер.

Розглянемо дві, тісно пов'язані між собою, задачі.

- Визначення границь кількості  $S$ -підмножин (тобто для  $p$ ) при заданих  $r$  (числа основних ребер моделі) і  $l$  – потужності множини  $L$ .
- Визначення границь для  $l$  при заданих  $p$  і  $r$ .

Під блокуванням вектора стану системи  $K(m,n)$  будемо розуміти, як уже зазначалося, запобігання втрати зв'язності графом моделі при появі цього вектора, незважаючи на те, що він містить  $m + 1$  нульову компоненту.

Визначимо поняття, про які йде мова. Нехай для вихідної  $GL$ -моделі існують різноманітні комбінації  $k_1, k_2, \dots, k_{C_r^l}$  по  $l$  пар ребер  $1 \leq l \leq C_r^2$ . Будь-яка комбінація  $k_i$  вимагає свого оптимального розбиття множини ребер  $GL$ -моделі на  $p_i$   $S$ -підмножин для вирішення задачі блокування.

Визначення:  $p_{min}(l)$  – мінімальне з  $p_i$ ,  $p_{max}(l)$  – максимальне з  $p_i$ . Інакше кажучи, верхня границя  $p_{max}(l)$  – це таке мінімальне число  $S$ -підмножин, яке в змозі блокувати будь-який набір елементів множини  $L$  потужністю  $l$ .  $p_{min}(l)$  – таке мінімальне число  $S$ -підмножин, яке забезпечує можливість блокування хоча б одного набору з  $l$  пар ребер, причому додавання хоча б одного елемента в множини  $L$  призвело б до розбиття на більше, ніж  $p_{min}(l)$ , число  $S$ - підмножин.

У той же час, мають місце всі можливі розбиття  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_t$  ребер  $GL$ -моделі на  $p$   $S$ -підмножин. Будь-яке розбиття  $\alpha_i$  є оптимальним для процедури блокування будь-яких множин пар ребер, серед яких є найбільша за потужністю, що включає  $l'_i$  пар, і найменша, що включає  $l''_i$  пар.

Визначення:  $l_{max}(p)$  – це максимальне з  $l'_i$ , а  $l_{min}(p)$  – мінімальне з  $l''_i$ .

Таким чином,  $l_{min}(p)$  – це таке мінімальне значення потужності множини  $L$ , для блокування якого необхідно розбити ребра графа на  $p$   $S$ -підмножин, інакше кажучи, це деяка комбінація з  $l$  пар, коли видалення хоча б одного елемента з множини  $L$  потребує менш, ніж  $p$   $S$ -підмножин з урахуванням вимоги мінімальності їх кількості.  $l_{max}(p)$  – це максимальна кількість пар ребер, для блокування яких достатньо розбити граф на  $p$   $S$ -підмножин.

У роботі показано, що при здійсненні оптимального розбиття множини ребер  $GL$ -моделі на  $S$ -підмножин граничні функції  $p_{min}(l)$  та  $l_{max}(p)$ , а також функції  $l_{min}(p)$  та  $p_{max}(l)$ , є взаємно зворотними. На основі цього в роботі визначені наступні границі:

$$l_{min}(p) = \frac{p(p-1)}{2}$$

$$p_{max}(l) = \frac{1 + \sqrt{1 + 8l}}{2}$$

$$l_{max}(r, p) = \frac{r^2 (p-1)}{2p}$$

$$p_{min}(l, r) = \frac{r^2}{r^2 - 2l}$$

При оптимізації перетворення моделей шляхом проведення внутрішніх ребер можуть виникнути певні труднощі. Однією з причин цього є так звані попарні реберні цикли (ПРЦ), суть яких полягає в наступному. Нехай необхідно блокувати деяку множину векторів стану системи, серед яких є вектори  $w_1, w_2$  і  $w_3$ , кожен з яких викликає зникнення своєї пари ребер. Якщо це пари  $(r_1, r_2)$ ;  $(r_2, r_3)$  і  $(r_3, r_1)$  відповідно, то вони утворюють своєрідний цикл – ПРЦ. Такий цикл може включати в себе будь-яке число ребер. Однак парний цикл для блокування всіх векторів, що призводять до появи ПРЦ, потребує всього одного додаткового ребра, тоді як непарний вимагає більше.

Обмежуючись розглядом утворення ПРЦ тільки трьома парами ребер, хоча все сказане нижче може бути узагальнене, сформульовані та доведені *твердження 2* і *твердження 3* для трьох векторів  $w_i \in W$  МВР-моделі  $K(3, n)$ .

*Твердження 2.*

ПРЦ має місце, тоді і тільки тоді, коли:

- 1) число різних ребер, що містяться в цих трьох парах, дорівнює 3;
- 2) жодна пара не повторюється.

Для визначення кількості векторів, які призводять до зникнення пари ребер, запропоновано використовувати дерево ієрархії.

Умови, що призводять до появи ПРЦ, сформовані та доведені в *твердженні 2*.

*Твердження 3.*

Три ребра  $GL$ -моделі та відповідні їм три вершини  $a, b, c$  дерева ієрархії можуть утворити ПРЦ тоді і тільки тоді, коли:

1) одна з вершин дерева (скажімо, вершина "a") лежить ближче двох інших до кореня дерева, і

2.1) або існує ланцюжок на дереві, на якому лежать всі три вершини,

2.2) або вершини  $b$  і  $c$  є суміжними до вершини  $d$ , і вершини  $a$  і  $d$  належать одній гілці.

У роботі розглянуті варіанти множин з 3-х векторів  $w_i \in W$ , які утворюють один і той же ПРЦ і отримані співвідношення, що дозволяють знаходити верхню і нижню границі кількості таких варіантів. Наводиться алгоритм, який дозволяє знаходити всі триреберні ПРЦ, і складається з наступних кроків.

1. Знайти множину  $S$  ребер і множину  $P$  пар ребер, що випадають при появі векторів стану ВБР із заданої множини  $W$ .

2. Визначити у множині  $S$  множину  $Q$  трійок ребер, що задовольняють умовам 1 і 2 твердження 3.

3. Кожному елементу  $q_i$  множини  $Q$  виділити підмножину  $R_i$  елементів  $p_i$  множини  $P$ , для яких виконується  $p_i \in q_i$ .

4. Виділити в кожній множині  $R_i$  підмножини  $T_i$ , що відповідають умовам твердження 2. ПРЦ в моделі утворюються при появі відповідних векторів стану ВБР.

Для визначення числа  $E$  різних ПРЦ, які можуть бути утворені в моделі, запропоновано наступне співвідношення:

$$E = r \cdot C_{q-1}^2 + \sum_{i=1}^{q-3} 2^{q-i} C_{q-i-1}^2 + s \cdot C_{q-1}^1 + \sum_{i=2}^{q-1} 2^{q-i} C_{q-i}^1,$$

де:  $r$  – загальне число вершин останнього каскаду дерева ієрархії;

$s$  – число парних вершин цього каскаду;

$q$  – число каскадів дерева:  $q = [\log n] - 1$ .

Автором виконано велику кількість експериментів з моделями. На графіку (рис. 7) представлена залежність числа ПРЦ від кількості векторів, що блокуються. Експеримент проводився для моделі  $K(3,31)$ .

Далі в розділі розглянуто інший шлях перетворення  $GL$ -моделей – трансформація реберних функцій. Для випадку моделі  $K(2,n)$  трансформація здійснюється шляхом додавання однієї або декількох змінних до певних реберних функцій  $GL$ -моделі базової ВБР. При невеликому числі векторів стані в з трьома нульовими компонентами виконання описаних змін призведе лише до незначних ускладнень моделі, і задача визначення зв'язності не ускладниться (додаткові ребра не проводяться). Запропоновано алгоритм виконання такого перетворення для блокування необхідної кількості векторів, основою якого служать декілька сформульованих і доведених у роботі положень.

Далі розглянуто загальний випадок – модель  $K(m,n)$ . Довільна реберна функція МВР моделі  $K(m,n)$  може бути представлена у вигляді

$$f_p = \kappa_1(i, n_1) \vee \kappa_2(m-i, n_2)$$

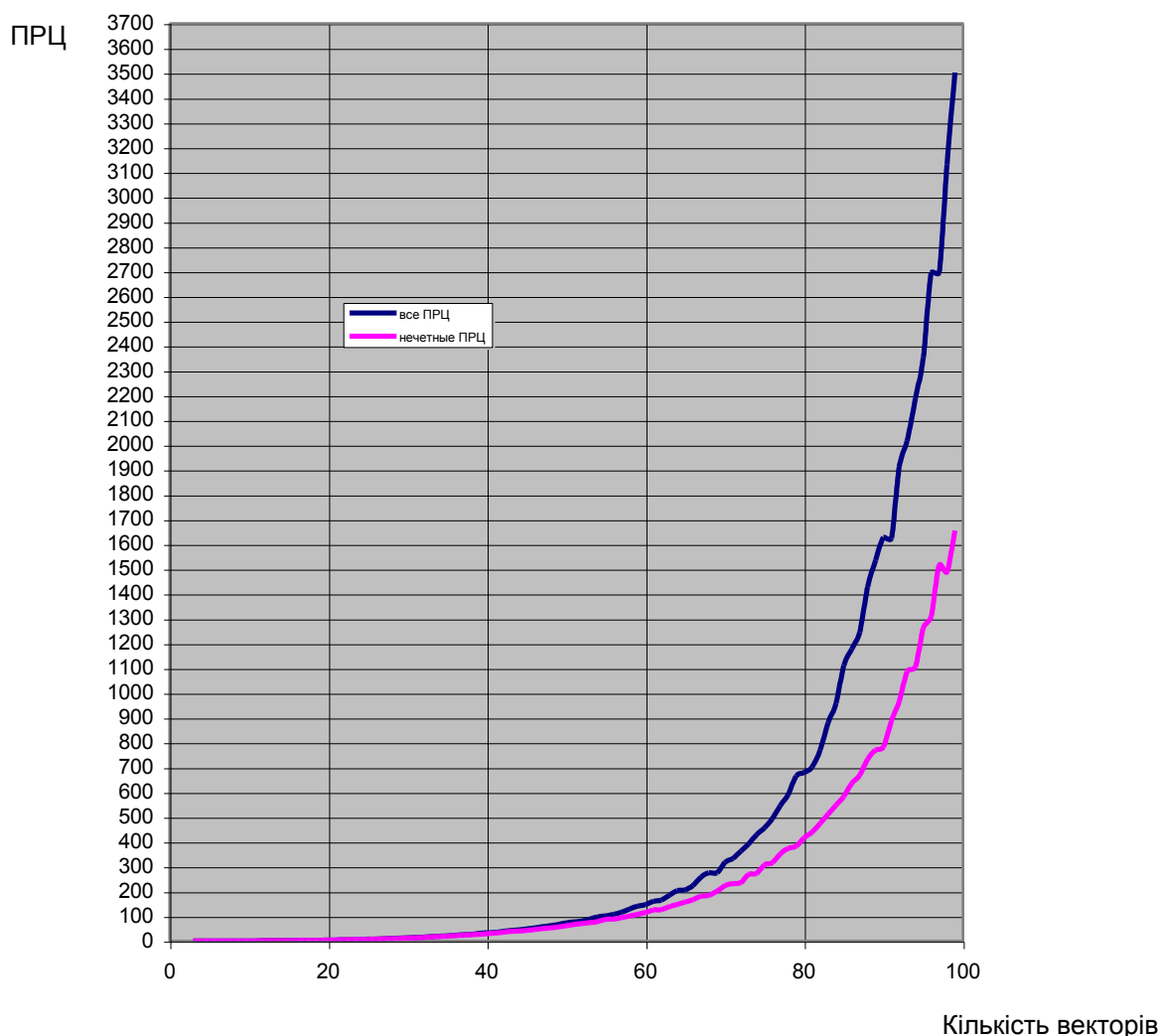


Рис. 7. Залежність числа ПРЦ від кількості векторів, що блокуються

Запропоновано модифікацію моделі роботи шляхом зміни виразу  $\kappa_1(i, n_1)$ , досліджено особливості та властивості такого перетворення і сформульовано умови блокування необхідної кількості векторів. Визначено характеристики векторів стану системи, що задовольняють сформульованим умовам, отримані відповідні кількісні оцінки.

Основні питання, розглянуті в **п'ятому розділі**, пов'язані з розрахунком ймовірності безвідмовної роботи систем, розробленим на основі виконання статистичних експериментів з *GL*-моделями поведінки ВБС у потоку відмов з використанням керованих генераторів псевдовипадкових двійкових векторів. Запропоновано проводити статистичний експеримент поетапно, використовуючи кероване неповторне джерело рівновагових (по Хемінгу) векторів, що представляють стан системи на кожному етапі. Запропоновано модифікації методу статистичних експериментів і отримано формули оцінки ймовірності безвідмовної роботи ВБС за заданий проміжок часу. Запропоновані модифікації враховують особливості побудови і функціонування відмовостійких багатопроцесорних систем, зокрема, ступінь

неоднорідності системи, різну інтенсивність відмов компонентів, ієрархічність ВБР, наявність різних підсистем, у тому числі таких, які мають спільні елементи, степені їх відмовостійкості, особливості  $GL$ -моделей, що використовуються. Отримані формули для оцінки ВБР строго доведені. Проаналізовано можливості скорочення кількості статистичних експериментів без втрати точності розрахунку і виведено співвідношення, що дозволяють це зробити з урахуванням ваги вектора стану системи, що моделюється.

Поставлена задача і сформульована ідея методу розрахунку ВБР ієрархічної ВБС, у якій є процесори, що одночасно входять до складу декількох підсистем. Запропонований метод дозволяє значно (у рази) скоротити час виконання статистичного експерименту за рахунок зменшення довжини вектора на виході джерела, що моделює потік псевдовипадкових векторів. ВБР підсистем розраховуються одночасно з урахуванням вектора, компонентами якого є стани загальних процесорів. Запропоновано відповідний алгоритм, зазначається, що його складність істотно залежить від кількості спільних елементів. Рішення поставленої задачі яким-небудь іншим способом автору не відомо.

Оскільки оцінка  $\bar{P}(y)$  ВБР виконується на основі виконання статистичного експерименту, необхідно враховувати похибку, яка при цьому виникає. Виконано аналіз причин і видів похибки, отримані співвідношення для оцінки методичної, трансформованої похибок і похибки округлення, а також сумарної похибки. Зокрема, методична складова визначається похибкою запропонованої статистичної оцінки. Якщо кількість статистичних експериментів досить велика, величину  $\bar{P}(y)$  можна вважати нормально розподіленою і використовувати для оцінки похибки правило «трьох сигм». Показано, що дисперсія розглянутої статистичної оцінки  $\bar{P}(y)$  має вигляд:

$$D(\bar{P}(y)) = \sum_{m=0}^n \left( \frac{C_n^m - L_m}{L_m} \left( \frac{C_n^m - 2}{C_n^m - 1} \sum_{\mathbf{X} \in W(n,m)} (\varphi(\mathbf{X})P(\mathbf{X}))^2 - \frac{1}{C_n^m - 1} \left( \sum_{\mathbf{X} \in W(n,m)} \varphi(\mathbf{X})P(\mathbf{X}) \right)^2 \right) \right),$$

де  $\mathbf{X}$  – вектор стану системи,  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – булеві змінні, що відображають стан процесорів,  $y = \varphi(\mathbf{X})$  – стан ВБС, який визначається за допомогою  $GL$ -моделі на векторі  $\mathbf{X}$ ,  $P(\mathbf{X})$  – ймовірність вектору стану системи,  $W(n, m)$  – множина всіх двійкових векторів довжини  $n$ , які мають  $m$  одиничних компонент (вага),  $L_0, \dots, L_n$  – кількість статистичних випробувань, що проводяться для кожної ваги  $m$ .



Врахована також похибка, яка може виникнути при використанні генератора, що допускає повторення векторів стану системи в процесі виконання статистичного експерименту.

В роботі показано, що дисперсію статистичної оцінки ймовірності безвідмовної роботи ВБС можна розглядати як функцію змінних. Задача мінімізації похибки, таким чином, була зведена до знаходження умовного екстремуму зазначеної функції, де умовою є обмеження загальної кількості (або часу) статистичних випробувань для всіх етапів моделювання. Отримано точне рішення описаної задачі знаходження умовного екстремуму і доведена його мінімальність:

$$L_i = \frac{\sqrt{A_i}}{\sqrt{A_0} + \dots + \sqrt{A_n}} L,$$

де  $L = \sum_{m=0}^n L_m$  – загальна кількість статистичних випробувань,

$$A_m = C_n^m \cdot \left( \frac{C_n^m - 2}{C_n^m - 1} \cdot \sum_{\mathbf{X} \in W(n,m)} (\varphi(\mathbf{X})P(\mathbf{X}))^2 - \frac{1}{C_n^m - 1} \cdot \left( \sum_{\mathbf{X} \in W(n,m)} \varphi(\mathbf{X})P(\mathbf{X}) \right)^2 \right).$$

Таким чином, були отримані співвідношення, що дозволяють визначити кількість статистичних випробувань для кожного етапу моделювання, що забезпечують мінімальну похибку при розрахунку ймовірності безвідмовної роботи ВБС. Точність розрахунку запропонованими методами підвищується на 10-12% в порівнянні з відомим методом «прискорення статистичних випробувань», що підтверджується численними експериментами.

Розглянуті шляхи підвищення надійності ВБС, проводиться їх класифікація. Як правило, реально використовуються шляхи, пов'язані з додатковим використанням тих чи інших видів надмірності (наприклад, введення в систему додаткових процесорів, використання вбудованого контролю тощо).

Запропоновано метод підвищення надійності базових ВБР за рахунок блокування відмови системи при появі деякої множини векторів стану з підвищеною кратністю відмов, що іноді може бути досягнуто виключно програмними засобами. Можливості методу аналізуються у двох аспектах. З одного боку, запропоновано спосіб пошуку множини згаданих векторів, який враховує ймовірності виходу з ладу кожного з процесорів. Введено поняття порівняння векторів. Нехай  $S(\mathbf{X}, n, m+n)$  – сума ймовірностей векторів довжиною  $m+n$  з числом одиничних компонент  $n$  і менших заданого вектора  $\mathbf{X} = \{x_{m+n}, x_{m+n-1}, \dots, x_1\}$ . Впорядковуючи за зростанням вектори множини  $W(n, m+n)$  відповідно до введеного правила, можемо визначити шукану підмножину додаткових векторів стану системи з наступної нерівності:

$$S(\mathbf{X}, n, m+n) \geq \Delta P.$$

Безпосереднє визначення  $S(\mathbf{X}, n, m+n)$  може вимагати значних обчислень. Пропонується метод прискореного обчислення, для чого на основі доведених в дисертації чотирьох тверджень виводиться рекурсивне співвідношення для  $S(\mathbf{X}, n, m+n)$ . Застосувавши його багаторазово, можна отримати наступну залежність:

$$S(\mathbf{X}, n, m+n) = \sum_{k=1}^n \left( P(\mathbf{X}_{r_k}^{m+n}) \cdot S(k, r_k - 1) \right),$$

де  $1 \leq k \leq n$  – номер одиничної компоненти,  $r_1, \dots, r_n$  – номери позицій одиничних компонент у векторі,  $\mathbf{X}_i^j = \{x_j, x_{j-1}, \dots, x_{i+1}, x_i\}$  – двійковий вектор, компонентами якого є булеві змінні  $x_j, x_{j-1}, \dots, x_{i+1}, x_i$ ,  $P(\mathbf{X}_i^j)$  – ймовірність вектора  $\mathbf{X}_i^j$ , яка дорівнює

$$P(\mathbf{X}_i^j) = \prod_{k=i}^j p_k, \quad S(i, j) – \text{сума ймовірностей векторів стану системи с заданим}$$

числом одиничних компонент  $i$ , та загальним числом  $j$  компонент, де  $n+m \geq j \geq i \geq 1$ . Величини  $S(i, j)$  можуть бути обчислені аналогічно алгоритму Рушді:

$$S(i, j) = p_j \cdot S(i-1, j-1) + q_j \cdot S(i, j-1),$$

при цьому граничні умови мають вигляд:  $S(0,0)=1$ ,  $S(0, j)=q_j \cdot S(0, j-1)$  при  $j > 0$ ,  $S(j, j)=p_j \cdot S(j-1, j-1)$  при  $j > 0$ ,  $S(i, j)=0$  при  $i < j$ .

З іншого боку, запропонована оцінка потужності множини векторів, які можна (і які слід) блокувати, використовуючи резерв продуктивності системи  $\Delta S$ , якщо він є. При цьому береться до уваги продуктивність кожного з процесорів. Всі процесори розбиваються на групи, в кожену групу входять процесори з однаковою продуктивністю. При цьому в  $h_i$ -й групі є  $a_i$  процесорів продуктивністю  $s_i$ . Позначимо через  $A_q$  якийсь вектор, компонентами якого є числа  $a_i^*$  (кількість процесорів цієї групи відповідно до вектору стану ВБС, які вийшли з ладу). Будується деяка множина  $A$  векторів  $A_q$ :  $A_q \in A$ , якщо

$$\sum_{i=1}^r a_i^* \cdot s_i \leq \Delta S$$

Тоді потужність множини  $W_s$  векторів, які можна блокувати, представляється у вигляді

$$|W_s| = \sum_{A_q \in A} \prod_{j=1}^r c_{a_j}^{a_j^*}.$$

Маючи обидві отримані оцінки, розробник може вибрати множину векторів, що блокуються, з урахуванням як продуктивності процесорів, так і інтенсивності їх відмов. Перевага методу - у відсутності необхідності введення додаткових процесорів.

В рамках загальної теорії гарантоздатності розглянута задача оцінки функціональної (технічної) безпеки багатопроцесорних систем управління також у двох аспектах. З одного боку, – для тих ситуацій, коли вектори небезпечних станів (тобто станів, коли будь-яка з функцій управління, без виконання якої об'єкт управління переходить в небезпечний стан) системи управління відомі, і, з іншого боку, при відомих заздалегідь обмеженнях з продуктивності. В обох випадках функціональна безпека БС оцінюється як ймовірність  $P_{oc}$  попадання системи в один з небезпечних станів за час  $t$ , зокрема, для методу, що враховує обмеження з продуктивності:

$$P_{i\bar{n}}(t) = \sum_{A_q \in A} \prod_{j=1}^r C_{a_j}^{a_j^*} (p_t(h_j))^{a_j - a_j^*} (1 - p_t(h_j))^{a_j^*},$$

де

$$A_q \in A, \text{ якщо } \sum_{j=1}^r (a_j - a_j^*) s(h_j) < S_{\zeta\hat{\alpha}i}^*$$

Для визначення  $P_{oc}$  в іншому випадку розроблено інверсну  $GL$ -модель, у якій зв'язність графу з'являється лише тоді, коли БС потрапляє в небезпечний стан. Досліджена модифікація методу для випадків, коли деяка множина процесорів системи вже вийшла з ладу.

У **шостому розділі** розглянуті питання практичного та технічного характеру. Для забезпечення нормального функціонування системи розрахунку, як це вказувалося в попередніх розділах, необхідно мати кероване джерело послідовності двійкових векторів, що моделює потік відмов багатопроцесорної системи. Запропоновано два методи синтезу схеми генератора псевдовипадкових двійкових векторів, що задовольняють вимогам системи розрахунку. Аналіз відомих рішень задачі синтезу генераторів рівновагових двійкових векторів показує їх основні недоліки: порівняно невисока швидкість через відносно довгий ланцюжок циклічного переносу і повторення векторів протягом періоду.

Перший запропонований метод вирішує завдання підвищення швидкодії. Ідея, що покладена в основу його синтезу, ілюструється схемою на рис.8 і полягає в організації керованого зсуву в вихідному регістрі-формувачі як це показано на рис. 9.

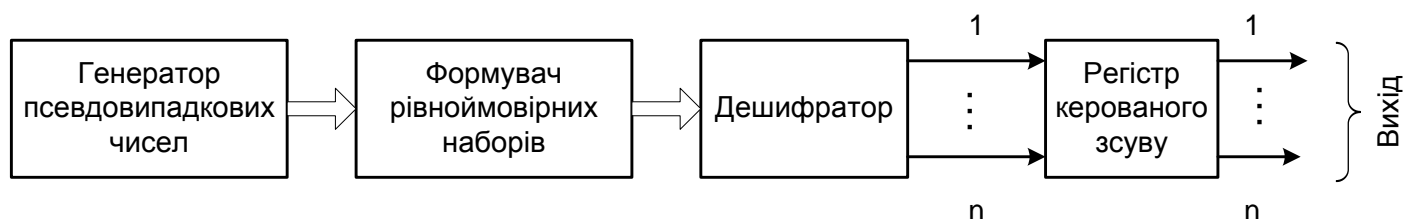


Рис. 8. Узагальнена структура формувача рівно вагових векторів

Тут кожному виходу  $i = 1, 2, \dots, n$  ( $n$  – розрядність вихідного набору генератора), ставиться у відповідність біт вихідного регістра керованого зсуву. При надходженні на

вхід дешифратора  $m$ -розрядного набору ( $m = \lceil \log_2 n \rceil$ ) від формувача рівномірних векторів відбувається логічна декомпозиція вихідного регістра на два незалежних зсувних підрегістра, в яких зсуви виконуються одночасно. Порівняння запропонованого генератора з відомим, побудованим за двоох'ярусної схемою, дає можливість стверджувати, що при більш високій складності (приблизно на 20%, логічні схеми, що здійснюють керований зсув, враховуються) швидкодія запропонованого рішення вище в рази (у наведеному в дисертації прикладі для  $n = 31$  в 5 разів). Звернемо увагу на те, що формувач на рис. 8 генерує рівно  $n$  векторів, що з'являються на його виході з однаковою ймовірністю, де  $n$  не обов'язково є числом степеня 2, як у відомих генераторах. Пропонується метод побудови такого формувача. Це призводить до того, що в кожному такті на виході генератора з'являється новий вектор, що зменшує непродуктивні втрати часу.

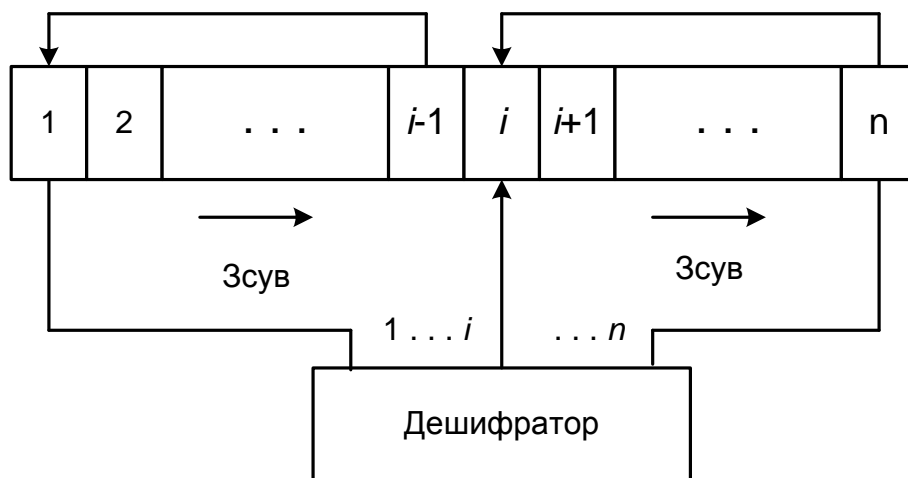


Рис. 9. Схема керування зсувами у вихідному регістрі

Слід зазначити, що запропонований генератор рівновагових векторів повторює вектори, що породжує певну похибку при виконанні статистичного експерименту. У дисертації запропоновано метод синтезу генератора, вільного від цього недоліку. Ідея побудови автономного джерела рівновагових двійкових векторів, полягає в затримці, тобто виключенні з процесу зсуву певного розряду вихідного регістра генератора в певні моменти часу. Всі вектори заданої ваги розбиваються на групи (до групи входять всі вектори, одержані один з одного циклічним зсувом), і визначаються можливості переходу з групи в групу. Перебір всіх груп фактично визначає період роботи генератора. Затримка або її відсутність визначається спеціальною функцією управління, яка залежить від змінних – розрядів регістра. В роботі доведено, що така функція завжди існує для будь-яких значень ваги  $p$  і довжини вектора, при цьому всі вектори з однаковою вагою генеруються без повтору на протязі періоду. Доказ цього положення зведено до побудови графа переходів станів генератора з наступним доказом існування в ньому гамільтонова циклу. Наведена формула, за якою визначаються функції управління для  $p = 2$ , а також таблиця для деяких значень  $p$  і  $n$ . У наведених прикладах функції управління є простими (безповторні і залежать не від усіх змінних).

## ВИСНОВКИ

В дисертації вирішено проблему підвищення ефективності розрахунку характеристик гарантоздатності, зокрема, самодіагностування, надійності та безпеки ВБС управління складними об'єктами на етапах проектування та експлуатації з урахуванням технічних параметрів та обмежень, таких як кількість процесорів, базова чи небазова система, ступінь відмовостійкості, ієрархічність архітектури системи, що аналізується, наявність або відсутність спільних процесорів у підсистемах, обмеження по часу самотестування, точність розрахунку, швидкодія процесорів та ін..

В області самодіагностування послаблено теоретичні обмеження по кількості процесорів, що тестують даний, з одного боку, і запропоновано метод організації взамотестування, що зменшує кількість перевірок майже до теоретичного мінімуму. Запропоновано новий універсальний підхід, комплекс методів та засобів, націлених на розрахунок характеристик надійності ВБС шляхом виконання статистичного експерименту с запропонованими графо-логічними моделями поведінки ВБС у потоці відмов, визначено теоретичні границі параметрів побудови базових моделей та їх перетворення, точності розрахунку безвідмовної роботи ВБС та переходу системи у небезпечний стан, зокрема, з урахуванням швидкодії процесорів, запропоновано низку методів синтезу та конкретних схем керованих генераторів псевдовипадкових двійкових векторів, що забезпечують виконання статистичного експерименту з моделями, оцінено час експерименту та похибку розрахунку, тобто проектувальнику ВБС надано новий універсальний інструмент, завдяки якому він може ще на етапі проектування виконати розрахунок характеристик надійності та безпеки роботи будь-якої ВБС, точність якого обмежується лише наявними обчислювальними ресурсами.

Основні наукові і практичні результати полягають у наступному/

1. З метою мінімізації часу самотестування  $m$ -відмовостійких  $n$ -процесорних систем запропоновано метод організації паралельного тестування ВБС, суть якого зводиться до використання запропонованих конструктивно регулярних діагностичних орграфів з  $K = 2$  ( $K$  – число процесорів, що тестують даний), виконання всіх можливих  $2n$  перевірок та подальшому аналізу результатів на основі положень, сформульованих у дисертації. Показано, що для  $m \leq 4$  в гіршому випадку може знадобитися не більше двох додаткових перевірок поза діагностичним графом. Відомі методи вимагають не менше  $Kn$  перевірок і  $K > 2$ . Ефективність методу – скорочення часу тестування на 30 – 50%.

2. Запропоновано узагальнення методу для  $m < n/2$  і  $K = m$ , що призводить до  $n + 2m$  перевірок при послідовному тестуванні (у кожний момент бере участь лише одна пара). Ефективність методу підвищується в рази. Розглянуто задачу підвищення ефективності самотестування ВБС для інших топологій (шинної і «матричної») за критеріями мінімальності апаратних і часових витрат, отримані співвідношення для оптимізації значень числа каналів зв'язку і запропоновано алгоритм розподілу процесорів на тестуючі підмножини.

3. Запропоновано принципи створення графо-логічних моделей (*GL*-моделей), що відображають поведінку ВБС  $K(m,n)$  в потоку відмов, відмінною рисою яких є приписування ребрам графа булевих функцій, змінними для яких є стани процесорів. Запропоновано метод формування базової (стійкою до відмов не більше  $m$ ) *GL*-моделі на основі циклічного графа і метод її мінімізації, що приводить до значного спрощення моделі. Запропоновано метод побудови МВР-моделі (втрачає мінімальну кількість ребер при появі  $m + 1$  відмов), яка зменшує час виконання одного експерименту і спрощує її подальше перетворення. Проаналізовано найбільш практично важливі критерії якості моделей та запропоновано метод пошуку оптимальної (за різними критеріями) моделі, основою якого є метод мінімізації.

4. Удосконалено метод перетворення базової моделі шляхом введення додаткових ребер для того, щоб відображення поведінки небазової ВБС в потоку відмов було адекватним. Проаналізована проблема, пов'язана з виникненням попарних реберних циклів (ПРЦ), які ускладнюють таке перетворення. Встановлено умови існування ПРЦ на базі запропонованого дерева ієрархії ребер базової моделі, встановлені теоретичні границі їх кількості, запропоновано методи зменшення їх числа, розроблена *GL*-модель, де ПРЦ відсутні. Для прикладу системи з  $N$  підсистем запропоновано метод, що дозволяє представляти *GL*-модель такої (у загальному небазової) системи як сукупність  $N + 1$  базових моделей.

5. Розглянуто інший шлях перетворення моделей – модифікація реберних функцій. Для моделі базової ВБС  $K(2,n)$  запропоновано метод трансформації, що незначно ускладнює модель, але дозволяє блокувати довільне задане число векторів стану системи з трьома відмовами. Для випадку  $K(m,n)$  запропоновано метод, заснований на перетворенні однієї реберної функції і аналізі залежності між її модифікацією і множиною векторів, які блокуються при появі векторів з  $m + 1$  нульовою компонентою. Для обох методів виведені відповідні співвідношення і запропоновані алгоритми їх реалізації. Перевага шляху перетворення – зменшення часу моделювання за рахунок спрощення задачі визначення зв'язності графу моделі.

6. Вирішена задача розрахунку ймовірності безвідмовної роботи (ЙБР) систем на основі виконання статистичних експериментів з описаними *GL*-моделями. Запропоновано модифікації методу статистичних експериментів і отримані формули для розрахунку ЙБР ВБС за заданий інтервал часу, а також похибки, що виникають при цьому. Запропоновані модифікації враховують особливості побудови і функціонування відмовостійких багатопроцесорних систем, зокрема, ступінь неоднорідності системи, різну інтенсивність відмов компонентів, ієрархічність ВБС, наявність різних підсистем, у тому числі таких, які мають спільні елементи, ступінь їх відмовостійкості, особливості *GL*-моделей, що використовуються. Перевагою запропонованого підходу є універсальність і можливість виконання розрахунку доступними обчислювальними ресурсами.

7. Запропоновано проводити статистичний експеримент поетапно, вибираючи на кожному етапі вектори стану системи з однаковим числом відмов. У роботі

показано, що задачу мінімізації похибки можна звести до знаходження умовного екстремуму функції, де умовою є обмеження загальної кількості статистичних випробувань для всіх етапів моделювання. Отримано співвідношення, що дозволяють визначити кількість випробувань для кожного етапу моделювання, що забезпечує мінімум похибки при оцінці ймовірності безвідмовної роботи ВБС.

8. Запропоновано метод підвищення надійності за рахунок внутрішніх резервів шляхом блокування відмови ВБС при появі деякої множини векторів стану з підвищеною кратністю відмов. Метод не потребує введення додаткових процесорів і аналізується в двох аспектах. З одного боку, запропоновано спосіб пошуку множини згаданих векторів, який враховує ймовірності виходу з ладу кожного з процесорів, з іншого – оцінка кількості векторів, які можна і які слід блокувати, використовуючи резерв продуктивності системи, якщо він є. Запропоновано метод оцінки функціональної (технічної) безпеки багатопроцесорних систем управління на базі розробленої інверсної *GL*-моделі, для двох випадків: коли вектори небезпечних станів системи управління відомі, та при заздалегідь відомих обмеженнях по продуктивності.

9. Для формування джерела потоку векторів стану ВБС з відмовами при виконанні статистичних експериментів з *GL*-моделями запропоновано метод синтезу керованого генератора псевдовипадкових рівновагових векторів (ГПВРВ) з підвищеною швидкодією (на прикладах - в разі по відношенню до відомих). Схема включає в себе генератор з рівномірним законом розподілу, в якого кількість векторів, що генеруються, не дорівнює степеню 2 і метод синтезу якого теж пропонується. Запропонована і апробована також ідея побудови автономного безповторного ГПВРВ, що полягає в затримці, тобто виключенні з процесу зсуву певного розряду вихідного регістра генератора в певні моменти часу під управлінням спеціальної функції. Доведено, що така функція завжди існує для будь-яких значень розрядності генератора  $n$  і ваги вектора  $p$ .

## **СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Romankevich V. A. Self-testing of multiprocessor systems with regular diagnostic connections / V. A. Romankevich // Automation and Remote Control. – 2017. – Vol. 78, Issue 2. – P. 289 – 299. (Іноземне видання – Реферується наукометричною базою SCOPUS).
2. Rabah AlShboul. *GL*-model. Representing Emergence of Dengerous State in Multiprocessor Management System / Rabah AlShboul, Vitaliy A. Romankevich // The World of Computer Science and Information Technology. – 2017. – Vol. 7, № 2. – P. 7 – 9. (Іноземне видання). – *Автором запропоновани ідея і метод побудови спеціальної інверсної GL-моделі.*
3. Морозов К.В. О характере влияния модификации рёберных функций *GL*-модели на её поведение в потоке отказов / К. В. Морозов, А. М. Романкевич, В. А. Романкевич // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2016. – № 6. – С. 108 – 112.

- (Реферується наукометричними базами Україніка наукова, Index Copernicus, INSPEC IDEAS (Institution of Engineering and Technology, Великобританія), CiteFactor, Academic Keys, Infobase Index). – *Автором сформульовані рекомендації щодо вибору реберних функцій, модифікація яких не викликає побічного ефекту з блокування векторів із відмовами підвищеної кратності.*
4. Tarassenko V. Statistical Experiments Error Minimization for Fault-tolerant Multiprocessor System Reliability Estimation / V.Tarassenko, V. Romankevych, A. Feseniuk // Journal of Qafqaz university. Mathematics and computer science. – 2016. – Vol. 4, № 2. – P. 140-146. (Іноземне видання). – *Автору належить ідея виконання статистичного експерименту з моделлю поетапно, на кожному етапі з векторами однакової ваги.*
  5. Морозов, К. В. Про модифікацію графо-логічної моделі / К. В. Морозов, В. О. Романкевич, К. Р. Потапова. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2015. – Том 3, № 34. – С. 42 – 49. (Реферується наукометричною базою РІНЦ). – *Автором сформульовані критерії появи побічного ефекту (блокування векторів із підвищеною кратністю відмов) в залежності від взаємного розташування функцій, що модифікуються.*
  6. Романкевич В. А. Анализ возможностей попадания многопроцессорной системы управления в опасное состояние с учётом производительности процессоров / В. А. Романкевич, С. А. Полещук, Е. Р. Потапова // Journal of Qafqaz university. Mathematics and computer science. – 2014. – Vol. 2, № 1. – P. 46 – 52. (Іноземне видання). – *Автором запропоновано метод розрахунку ймовірності переходу БС в безпечний стан з урахуванням продуктивності процесорів системи.*
  7. Романкевич В. А. Об одном методе модификации реберных функций GL-моделей / В. А. Романкевич, К. В. Морозов, А. П. Фесенюк // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2014. – № 6. – С. 95 – 99. (Реферується наукометричними базами Україніка наукова, Index Copernicus, INSPEC IDEAS (Institution of Engineering and Technology, Великобританія), CiteFactor, Academic Keys, Infobase Index). – *Автором запропоновано спосіб обчислення кількості векторів, при появі яких вихідна та модифікована моделі відрізняються.*
  8. Романкевич А. М. О формировании функций управления для генератора последовательностей двоичных векторов / А. М. Романкевич, И. В. Майданюк, В. А. Романкевич // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2014. – № 6. – С. 157 – 163. (Реферується наукометричними базами Україніка наукова, Index Copernicus, INSPEC IDEAS (Institution of Engineering and Technology, Великобританія), CiteFactor, Academic Keys, Infobase Index). – *Автором запропоновано метод та алгоритм формування функцій управління зворотнім зв'язком генератора рівновагових двійкових векторів.*
  9. Романкевич В. А. Самотестирование многопроцессорных систем с шинной архитектурой / В. А. Романкевич // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2014. –



- № 5. – С. 96 – 99. (Реферується наукометричними базами Україніка наукова, Index Copernicus, INSPEC IDEAS (Institution of Engineering and Technology, Великобританія), CiteFactor, Academic Keys, Infobase Index).
10. Романкевич В. А. Определение достаточного уровня отказоустойчивости для обеспечения заданной вероятности безотказной работы многопроцессорной системы / В. А. Романкевич, А. П. Фесенюк, К. В. Морозов // Journal of Qafqaz university. Mathematics and computer science. – 2013. – Vol. 1, № 2. – P. 118 – 126. (Іноземне видання). – *Автору належать ідея та алгоритм розрахунку допустимої кількості процесорів, що відмовили, з урахування внутрішніх резервів системи.*
11. Романкевич А. М. Об одной GL-модели системы со скользящим резервом / А. М. Романкевич, В. А. Романкевич, К. В. Морозов // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* – 2013. – № 5. – С. 333 – 336. (Реферується наукометричними базами Україніка наукова, Index Copernicus, INSPEC IDEAS (Institution of Engineering and Technology, Великобританія), CiteFactor, Academic Keys, Infobase Index). – *Автором запропоновано метод спрощення моделі системи, деякі з підсистем якої завжди потребують використання спільних процесорів.*
12. Гроль В. В. Об оптимизации процедуры реконфигурирования в многопроцессорных системах / В. В. Гроль, В. А. Романкевич, Мораведж Сейед Милад // *Известия Саратовского университета. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика.* – 2012. – Т. 12, вып.4. – С. 112 – 115. (Іноземне видання). – *Автору належать метод та алгоритм скорочення часу процедури відновлення роботи системи при відмові її процесорів за рахунок оптимізації розподілення процесорів по підмножинам.*
13. Романкевич А. М. Об одной задаче реконфигурирования в многопроцессорных системах / А. М. Романкевич, Мораведж Милад, В. А. Романкевич, К. В. Морозов // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* – 2012. – № 5. – С. 91 – 94. (Реферується наукометричними базами Україніка наукова, Index Copernicus, INSPEC IDEAS (Institution of Engineering and Technology, Великобританія), CiteFactor, Academic Keys, Infobase Index). – *Автором обґрунтовано метод зменшення перебору варіантів під час організації реконфігурування БС при відмові тієї чи іншої множини процесорів.*
14. Moravej Milad. The probability of multiprocessor system falling into dangerous state estimation / Moravej Milad, A. P. Feceniuk, V. A. Romankevich // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* – 2012. – № 6. – С. 38 – 41. (Реферується наукометричними базами Україніка наукова, Index Copernicus, INSPEC IDEAS (Institution of Engineering and Technology, Великобританія), CiteFactor, Academic Keys, Infobase Index). – *Автором запропоновано метод розрахунку ймовірності переходу БС в один з небезпечних станів у випадку, коли вони заздалегідь відомі.*
15. Гроль В. В. О взаимном тестировании компонентов в многопроцессорных системах / В. В. Гроль, В. А. Романкевич, Мораведж Милад, Е. Р. Потапова // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* – 2012. – № 7. – С. 131 – 134. (Реферується

- наукометричними базами Україніка наукова, Index Copernicus, INSPEC IDEAS (Institution of Engineering and Technology, Великобританія), CiteFactor, Academic Keys, Infobase Index). – *Автором сформульовані критерії розподілу процесорів по підмножинах при організації самотестування БС, запропоновано використання матриц-циркулянтів з метою підвищення ефективності розподілу.*
16. Романкевич В. А. Структурный метод формирования двоичных псевдослучайных векторов заданного веса / В. А. Романкевич, И. В. Майданюк // Управляющие системы и машины. – 2011. – № 5. – С. 28 – 33, 58. – *Автору належать ідея та метод побудови генератора послідовності двійкових рівновагових векторів з управлінням спеціальними булевими функціями участі у зсуві розрядів регістра зсуву.*
17. Романкевич А. М. Об одном методе расчета показателей надежности отказоустойчивых многопроцессорных систем / А. М. Романкевич, В. А. Романкевич, А. П. Фесенюк // Управляющие системы и машины. – 2011. – № 6. – С. 14 - 18, 37. – *Автору належить ідея виконання статистичних експериментів з GL-моделями для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи ВБС та обґрунтування умов мінімізації похибки розрахунку.*
18. Романкевич В. О. Про розрахунок надійності відмовостійких багатопроцесорних систем, підсистеми яких мають спільні процесори / В. О. Романкевич, А. П. Фесенюк // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 3. – С. 62 – 67. – *Автором запропоновано підхід до розрахунку показників надійності ВБС з підсистемами, що мають спільні процесори.*
19. Романкевич В. А. Об одном алгоритме преобразования GL-моделей / В. А. Романкевич, А. А. Ефремова, А. С. Гаврилюк // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 5. – С. 186 – 191. – *Автору належить метод перетворення.*
20. Гроль В. В. Структурный метод генерации псевдослучайных последовательностей специального вида / В. В. Гроль, В. А. Романкевич, Е. Р. Потапова, Мораведж Сейед Милад // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 5. – С. 230 – 236. – *Автором запропоновано розбиття розрядів ГПВЧ на підгрупи та використання дешифраторів для кожної з груп.*
21. Романкевич А. М. Частный случай граничных оценок при построении и преобразовании GL-модели / А. М. Романкевич, И. В. Майданюк, В. А. Романкевич // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 6. – С. 236 – 245. – *Автору належить ідея побудови дерева ієрархії реберних функцій 2-відмовостійкої моделі, яке дозволяє ефективно визначати можливість видалення з моделі тієї чи іншої пари ребер. Сформульовано відповідні умови.*
22. Романкевич А. М. Оценка погрешности статистического расчёта надёжности ОМС, которым соответствуют иерархические GL-модели / А. М. Романкевич, В. В. Гроль, В. А. Романкевич, А. П. Фесенюк // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 7. – С. 142 – 146. – *Автором запропоновано алгоритм (методика) виконання*

*статистичного експерименту, який дозволяє мінімізувати загальну похибку розрахунку характеристик надійності ВБС.*

23. Романкевич А. М. О повышении надёжности реконфигурируемых отказоустойчивых систем управления сложными объектами / А. М. Романкевич, В. А. Романкевич, Мораведж Сейед Милад // Электронное моделирование. – 2010. – Т. 32, № 4. – С. 85 – 92. – *Автором запропоновані ідея та метод підвищення надійності ВБС за рахунок внутрішніх резервів, зокрема резервів продуктивності.*
24. Романкевич В. О. Про архітектуру спеціалізованої комп'ютерної системи розрахунку показників надійності відмовостійких багатопроцесорних систем / В. О. Романкевич, В. Ф. Банас // Вісник університету «Україна». Інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика. – 2010. – № 8. – С. 75 – 80. – *Дисертанту належить формування вимог до блоків системи.*
25. Романкевич В. О. Генератор рівноважних векторів для проведення статистичних експериментів з GL-моделями / В. О. Романкевич, І. В. Майданюк, А. П. Фесенюк, Д. С. Шкира // Науковий вісник Чернівецького університету. Сер.: Комп'ютерні системи та компоненти. – 2010. – Т. 1, вип. 2. – С. 28 – 30. – *Дисертантом запропоновано прискорений алгоритм формування послідовності рівноважних векторів.*
26. Гроль В. В. Об оценке погрешности расчета надежности отказоустойчивых многопроцессорных систем / В. В. Гроль, В. А. Романкевич, А. П. Фесенюк // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 5. – С. 56 – 59. – *Автором запропонована методика прискореного розрахунку показників надійності ВБС без збільшення похибки.*
27. Романкевич В. А. GL-модель комбинированных 3-out-of-n:F, 3<sub>IC</sub>-out-of-n:G систем / В. А. Романкевич, Т. Г. Сапсай, А. А. Ефремова // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – № 6. – С. 50 – 54. – *Автором запропонований метод формування GL-моделей для комбінованих 3-out-of-n:F, 3<sub>IC</sub>-out-of-n:G систем.*
28. Романкевич В. А. Некоторые количественные оценки в GL-моделях / В. А. Романкевич // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2008. – № 48. – С. 72 – 77.
29. Романкевич А. М. Граничные оценки числа рёбер GL-моделей поведения отказоустойчивых многопроцессорных систем в потоке отказов / А. М. Романкевич, В. А. Романкевич, И. В. Майданюк // Электронное моделирование. – 2008. – № 1, т. 30. – С. 59 – 70. – *Автором сформульована та вирішена задача визначення верхньої та нижньої границь кількості додаткових ребер, що вводяться в базову GL-модель та забезпечують її адекватність при перетворенні.*
30. Романкевич В. А. Иерархическая модель поведения ОМС в потоке отказов / В. А. Романкевич, Е. Р. Потапова, Бахтари Хедаятоллах // Электронное моделирование. – 2008. – № 4, т. 30. – С. 75 – 84. – *Автору належить ідея та метод формування нециклічної МУ моделі.*

31. Романкевич А. М. Об одном способе оптимизации моделей поведения отказоустойчивых многопроцессорных систем / А. М. Романкевич, В. А. Романкевич, Бахтари Хедаятоллах // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2008. – № 7. – С. 49 – 52. – *Дисертантом виконано аналіз можливостей виникнення ПРЦ при перетворенні моделей.*
32. Гроль В. В. Оценка погрешности формирования управляемых псевдослучайных последовательностей / В. В. Гроль, В. А. Романкевич, Али Фаллаг, А. П. Фесенюк // *Вісник Хмельницького національного університету «Технічні науки»*. – Хмельницький 2007. – Т. 1. – С. 149 – 152. – *Автору належить формулювання задачі та дослідження впливу похибки генератора на похибку розрахунку характеристик надійності багатопроцесорної системи.*
33. Романкевич В. А. Условия существования попарных рёберных циклов в  $GL$ -моделях  $K(3, n)$  / В. А. Романкевич, А. А. Кононова, Бахтари Хедаятоллах // *Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка*. – 2007. – № 46. – С. 54 – 61. – *Дисертантом розроблено основні положення, що визначають можливість випадання в моделі двох ребер одночасно згідно дерева ієрархії.*
34. Романкевич В. А. Об одном методе преобразования  $GL$ -моделей поведения отказоустойчивых многопроцессорных систем в потоке отказов / В. А. Романкевич, А. А. Кононова // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2007. – № 7. – С. 49 – 56. – *Автором запропоновано метод перетворення  $GL$ -моделі 2-відмовостійкої ВБС.*
35. Романкевич В. А. Об одном способе построения  $GL$ -моделей отказоустойчивых многопроцессорных систем / В. А. Романкевич // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2006. – № 7. – С. 47 – 51.
36. Романкевич В. А.  $GL$ -модель поведения отказоустойчивых многопроцессорных систем с минимальным числом теряемых рёбер / В. А. Романкевич, Е. Р. Потапова, Бахтари Хедаятоллах, В. В. Назаренко // *Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка*. – 2006. – № 45. – С. 93 – 100. – *Автором розроблено основні положення формування МВР-моделі.*
37. Романкевич В. А. Особенности использования универсальной  $GL$ -модели  $K(M, N)$  применительно к 2-отказоустойчивым многопроцессорным системам / В. А. Романкевич, А. А. Кононова, Рабах Мох'д Ахмад Аль Шбуль // *Вісник Технологічного університету Поділля. «Технічні науки»*. – Хмельницький 2005. – Ч. 1, т. 1. – С. 86 – 90. – *Дисертантом виявлено переваги та недоліки формування моделі 2-відмовостійкої системи за допомогою універсальної моделі.*
38. Романкевич А. М. Анализ отказоустойчивых многомодульных систем со сложным распределением отказов на основе циклических  $GL$ -моделей / А. М. Романкевич, В. В. Иванов, В. А. Романкевич // *Електронное моделирование*. – 2004. – № 5, т. 26. – С. 67 – 81. – *Автором запропоновано два основних підходи до перетворення базових  $GL$ -моделей.*

39. Романкевич А. М. Граничные характеристики графо-логической модели 2-отказоустойчивой многопроцессорной системы / А. М. Романкевич, В. А. Романкевич, А. А. Кононова // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2004. – № 42. – С. 28 – 39. – *Автором сформульовано та доведено умови випадання в моделі двох або трьох ребер одночасно.*
40. Романкевич А. М. Архитектура системы, обеспечивающей проведение экспериментов с GL-моделями / А. М. Романкевич, В. В. Иванов, В. А. Романкевич // Вісник Технологічного університету Поділля. «Технічні науки». – Хмельницький. – 2004. – Ч. 1, т. 2. – С. 7 – 10. – *Автором розроблено ту частину архітектури спеціалізованої системи, що пов'язана з розрахунком ймовірності безвідмовної роботи системи, яка проектується.*
41. Романкевич А. М. О минимизации базовых циклических GL-моделей / А. М. Романкевич, Рабах Мох'д Ахмад Ал Шбул, В. В. Назаренко // Вісник Технологічного університету Поділля. «Технічні науки». – Хмельницький. – 2004. – Ч. 1, т. 2. – С. 42 – 46. – *Дисертанту належить ідея та умови мінімізації GL-моделей загального виду.*
42. Романкевич А. М. О некоторых особенностях GL-моделей  $K(2,n)$  / А. М. Романкевич, В. А. Романкевич, А. А. Кононова, Рабах Ал Шбул // Вісник НТУУ "КПІ". Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2004. – № 41. – С. 85 – 92. – *Автором виконано дослідження можливості втрати моделлю різної кількості ребер.*
43. Гроль В. В. Об одной особенности тестирования моделей отказоустойчивых многопроцессорных систем при расчёте их надёжности / В. В. Гроль, М. Н. Орлова, В. А. Романкевич, Рабах Ал Шбул // Вісник Технологічного університету Поділля. «Технічні науки». – Хмельницький. – 2003. – Т. 2. – С. 40 – 43. – *Автором виконано аналіз можливої похибки при розрахунку параметрів надійності ВБС за допомогою GL-моделей.*
44. Гроль В. В. Формирование псевдослучайных векторов состояний ОМС при расчёте надёжностных характеристик / В. В. Гроль, Л. Ф. Карачун, М. Н. Орлова, В. А. Романкевич // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2002. – № 37. – С. 156 – 165. – *Автору належить формулювання основних вимог до послідовності двійкових векторів щодо виконання статистичного експерименту при розрахунку характеристик надійності ВБС.*
45. Романкевич А. М. Об одном подходе к расчёту надёжности отказоустойчивых многопроцессорных систем / А. М. Романкевич, В. В. Гроль, Л. Ф. Карачун, М. Н. Орлова, В. А. Романкевич // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – ХНУРЭ. – Харьков. – 2002. – № 119. – С. 54 – 58. – *Автору належить методика виконання розрахунку за допомогою статистичних експериментів.*
46. Романкевич, О. М. Аналіз відмовостійких багатопроцесорних систем на основі графо-логічних моделей нециклічного типу / О. М. Романкевич, В. О. Романкевич,

- О. В. Богуславський, Ал Шбул Рабах // Вісник Технологічного університету Поділля. «Технічні науки».- Хмельницький. – 2002. – Т. 2. – С. 30 – 33. – *Автором запропоновано декілька варіантів графів базових моделей більш складних, ніж простий цикл, досліджені властивості подібних моделей.*
47. Романкевич А. М. Алгоритм синтеза базовой GL-модели / А. М. Романкевич, А. С. Орловский, В. А. Романкевич // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2001. – № 35. – С. 132 – 135. – *Автором запропоновано метод формування реберних функцій базової моделі канонічного типу.*
48. Романкевич В.О. Метод статистичних випробувань для оцінки показників функціональної безпеки ієрархічної відмовостійкої багатопроцесорної системи управління / В.О. Романкевич, А.П. Фесенюк, К.О. Міліч // Сучасні інформаційні технології 2017 (MIT-2017). Збірник тез доповідей. – Одеса, ОНПУ (22 – 24 травня 2017р.). – Одеса, ОНПУ. – 2017. – С. 47 – 48. – *Автором запропоновано інверсну GL-модель.*
49. Романкевич В. А. Об одном способе формирования рёберных функций GL-модели / В. А. Романкевич, М. О. Малышева, И. К. Примак // Системный анализ и информационные технологии: материалы 18-й Международной научно-практической конференции SAIT 2016. – К.: УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ», 2016. – С. 406. *Автору належить алгоритм формування реберних функцій.*
50. Романкевич В. А. О минимизации времени самотестирования многопроцессорных систем / В. А. Романкевич, Б. А. Корнейчик, В. В. Олейник // Комп'ютерні системи і проектування технологічних процесів та обладнання: Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції (17– 19 лютого 2016р). – Чернівці: ЧФ НТУ «ХПІ», 2016. – С. 42 – 44. *Дисертантом запропоновано метод взаємотестування на базі побудови структурно регулярного діагностичного графу.*
51. Морозов К. В. О графо-логических моделях взвешенных систем / К. В. Морозов, В. А. Романкевич, В. В. Олейник // Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості. Матеріали II всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів. – Івано-Франківськ, 2015. – С. 206 – 207. *Автору належить ідея дублювання компонентів (змінних) у векторі стану системи для моделювання поведінки систем, компоненти яких мають цілі ваги.*
52. Романкевич В. О. Дослідження імовірнісних характеристик генератора двійкових векторів заданої ваги з керованою перестановкою / В. О. Романкевич, Г. А. Бахтоваршоев, Б. А. Корнейчик // 4-а міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія», Вінниця, 28–30 травня 2014р.: зб. тез доповідей. – Вінниця, ВНТУ. – 2014. – С. 169 – 171. *Автором запропоновано методу виконання дослідження.*
53. Гроль В. В. Упрощенная 3-отказоустойчивая GL-модель для отказоустойчивых многопроцессорных систем / В. В. Гроль, К. В. Морозов, В. А. Романкевич // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Матеріали доповідей 25-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективные компьютерные,

- управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины», м.Алушта, вересень 2012р.– 2012. – №5. – С. 90. *Автором виконано аналіз граничних параметрів моделі для 3-відмовостійкої системи.*
54. Романкевич В. А. Построение GL-моделей поведения в потоке отказов для систем со скользящим резервом / В. А. Романкевич, Мораведж Милад, К. В. Морозов // Третя міжнародна науково-практична конференція «Методи та засоби кодування, захисту й ущільнення інформації»: тези доповідей. – Вінниця, ВНТУ. – 2011. – С. 36 – 37. *Автору належить ідея побудови моделі небазової системи шляхом об'єднання декількох базових моделей.*
55. Romankevych Oleksiy. The Models reflecting reaction of the fault-tolerant multiprocessor systems to faults appearance / Oleksiy Romankevych, Volodymyr Grol, Vitaliy Romankevych, Kateryna Potapova // Abstracts of Scientific Information for society – from Today to the Future (CODATA-21). – Ukraine, Kyiv. – October 5 – 8. – 2008. – P. 76. *Автором розроблено модифікацію GL-моделі з метою мінімізації часу діагностичного експерименту.*
56. Романкевич В. А. Рекурсивный метод генерации реберных функций графологических моделей отказоустойчивых многопроцессорных систем / В. А. Романкевич, А. С. Дрёмин, Я. В. Крохмаль // Компьютерные науки и информационные технологии: Тезисы докладов Междунар. научной конференции, посвящённой памяти проф. А.М.Богомолова. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2007. – С. 97 – 98. *Автором запропоновано кон'юнктивну GL-модель.*
57. Romankevich V. The some properties of model's of k-out-of-n system's behavior in the stream of faults / V. Romankevich, K. Potapova, Hedayatollah Bakhtari // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium. – Armenia, Yerevan, September 2007. – P.763. *Автором запропонована ідея використання дерева ієрархії реберних функцій для дослідження властивостей GL-моделі 3-відмовостійкої ВБС.*
58. Romankevych A. Some characteristics of FTCS behavior (in the flow of faults) / A. Romankevych, V. Romankevych, A. Kononova // Proceeding of East-West Design & Test Workshop (EWDWTW'04). - Kharkov National University of Radioelectronics. - Kharkov, 2004. - P. 69. *Автором запропоновано визначення граничних характеристик 2-відмовостійких моделей.*
59. Романкевич В. О. Програма для знаходження 0-ланцюжків під час самодіагностування у багато процесорних системах / В. О. Романкевич, В. О. Яшунін, Є. Вербицький, В. В. Олійник // Рішення про реєстрацію договору, який стосується права автора на твір № 2895 від 01.03.2016. *Автором розроблено алгоритм пошуку.*
60. Романкевич В. О. Графічний редактор графо-логічних моделей / В. О. Романкевич, І. В. Васильєва, О. О. Майданюк, А. О. Цвяк, Лю Хунбо // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49375 від 30.05.2013. *Дисертантом розроблено узагальнення способу формування GL-моделі.*

61. Романкевич В. О. Програма формування функції затримки для генератора рівновагових двійкових векторів з заданою вагою  $k=3$  / В. О. Романкевич, Мораведж Сейєд Мілад, І. В. Майданюк, А. О. Цвяк // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 48088 від 28.02.2013. *Автором запропоновано алгоритм формування функції.*
62. Романкевич В. О. Програма для підрахунку значень булевих функцій за вхідним булевим вектором / В. О. Романкевич, І. В. Васильєва, О. О. Майданюк, Р. П. Селецька // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49373 від 30.05.2013. *Автором запропоновано прискорений алгоритм підрахунку при формуванні функції зворотнього зв'язку генератора.*
63. Романкевич В.О., Мораведж Сейєд Мілад, Токарева Т.А., Цвяк А.О. Програма прискореної генерації псевдовипадкових послідовностей рівновагових двійкових векторів / В. О. Романкевич, Мораведж Сейєд Мілад, Т. А. Токарева, А. О. Цвяк // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 48089 від 28.02.2013. *Дисертантом розроблено загальний принцип функціонування автономного безповторного генератора.*
64. Шурига О. В. Програма формування та оцінки складності реберних функцій графо-логічної моделі поведінки відмовостійких багатопроцесорних систем у потоці відмов методом поділу множини змінних на дві рівні частини і методом нерівного поділу / О. В. Шурига, К. В. Морозов, В. О. Романкевич // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 39445 від 02.08.2011. *Автором розроблено загальну оцінку характеристик моделей.*

#### Анотація

**Романкевич В.О. Методи і засоби оцінки технічних характеристик гарантоздатності відмовостійких багатопроцесорних систем управління складними об'єктами.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2017.

Розглядається проблема організації самотестування відмовостійких багатопроцесорних систем (ВБС) управління, пропонується низка методів підвищення ефективності самотестування для різних топологіях зв'язків.

Розглядаються принципи побудови графо-логічних моделей (*GL*-моделей), що відображають поведінку ВБС у потоці відмов. Пропонуються нові методи формування таких моделей, особливістю яких є присвоєння булевих функцій ребрам графа, їх мінімізації та перетворення, визначаються зони, в границях яких подібні перетворення можливі. Пропонуються методи розрахунку ймовірності безвідмовної роботи ВБС шляхом виконання статистичних експериментів з *GL*-моделями та визначення похибки.



Пропонується метод підвищення надійності ВБС за рахунок внутрішніх резервів, а також метод розрахунку рівня технічної безпеки БС з використанням *GL*-моделей. Пропонуються методи синтезу генераторів псевдовипадкових рівновагових векторів, що орієнтовані на виконання статистичних експериментів з *GL*-моделями.

**Ключові слова:** гарантоздатність, відмовостійкість, багатопроцесорні системи, самодіагностування, *GL*-моделі, статистичні методи розрахунку надійності, похибка розрахунку, технічна безпека, генератори псевдовипадкових рівновагових векторів.

#### Аннотація

**Романкевич В.А. Методы и средства оценки технических характеристик гарантоспособности отказоустойчивых многопроцессорных систем управления сложными объектами.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2017.

С целью минимизации времени самотестирования *m*-отказоустойчивых многопроцессорных систем (ОМС) предложен метод организации тестирования, суть которого сводится к использованию структурно регулярных диагностических оргграфов с  $K = 2$  ( $K$  – число процессоров, тестирующих данный), выполнению всех возможных  $2n$  проверок и последующему анализу результатов. Показано, что для  $m \leq 4$  в худшем случае может потребоваться не более двух дополнительных проверок. Обобщение предложенного метода для  $m < n/2$  и  $K = m$  приводит к  $n + 2m$  проверкам.

Рассмотрена задача повышения эффективности самотестирования ОМС с учетом других топологий (шинной и матричной). Получены соотношения для оптимизации значений числа каналов связи и предложен алгоритм распределения процессорных элементов на тестирующие подмножества.

Рассмотрены принципы создания графо-логических моделей (*GL*-моделей), отражающих поведение ОМС  $K(m, n)$  в потоке отказов, отличительной особенностью которых является приписывание булевых функций ребрам графа. Предложен метод формирования базовой (устойчивой к не более  $m$  отказам) *GL*-модели на основе циклического графа и метод ее минимизации, приводящий к значительному упрощению модели. Метод позволяет строить модель с минимальным числом выпадающих ребер (МВР-модель) при появлении  $m+1$  отказа. Проанализированы наиболее практически важные критерии качества моделей и предложен метод поиска оптимальной (по разным критериям) модели, основой которого является метод минимизации.

Рассматривается возможность построения *GL*-модели, адекватной поведению небазовой ОМС в потоке отказов. Предлагается решать эту задачу преобразованием базовой модели двумя путями. Первый путь – введение внутренних ребер в граф модели. Внутреннее ребро должно блокировать потерю связности графом при

появлении определенных векторов состояния системы, которые отличают ее от базовой. Решается задача минимизации числа внутренних (дополнительных) ребер, получены соответствующие верхняя и нижняя границы. Для примера системы из  $N$  подсистем со скользящим резервом предлагается метод, позволяющий представлять  $GL$ -модель такой (в общем небазовой) системы как совокупность  $N+1$  базовых моделей.

Анализируется проблема, связанная с возникновением попарных реберных циклов (ПРЦ), которые усложняют преобразование модели. Предложены методы оценки количества ПРЦ, уменьшения их числа вплоть до отсутствия (предложена соответствующая  $GL$ -модель).

Другой путь преобразования моделей – модификация реберных функций. Для модели базовой ОМС  $K(2,n)$  предлагается метод трансформации, незначительно усложняющий модель, но позволяющий блокировать произвольное заданное число векторов состояния системы с тремя отказами. Для случая  $K(m,n)$  предлагается метод, основанный на преобразовании одной реберной функции и анализе зависимости между ее модификацией и множеством векторов, которые блокируются. Для обоих методов выводятся соответствующие соотношения и предлагаются алгоритмы их реализации.

Решается задача расчета вероятности безотказной работы (ВБР) систем, производимого на основе выполнения статистических экспериментов с описанными  $GL$ -моделями. Предложены модификации метода статистических экспериментов и получены формулы для расчета ВБР ОМС за заданный промежуток времени, а также возникающей при этом погрешности. Предложенные модификации учитывают особенности построения и функционирования отказоустойчивых многопроцессорных систем, в частности, степень неоднородности системы, различную интенсивность отказов компонентов, иерархичность ОМС, наличие различных подсистем, в том числе таких, которые имеют общие элементы, степень их отказоустойчивости, особенности используемых  $GL$ -моделей.

Предлагается метод повышения надежности за счет внутренних резервов: блокирования отказа ОМС при появлении некоторого множества векторов состояния с повышенной кратностью отказов. Метод анализируется в двух аспектах. С одной стороны, предлагается вероятностная оценка числа упомянутых векторов, с другой – оценка количества векторов, которые можно и которые следует блокировать, используя резерв производительности системы, если он имеется. Предлагается метод оценки функциональной (технической) безопасности многопроцессорных систем управления, использующий  $GL$ -модели, для двух случаев: когда векторы опасных состояний системы управления известны, и, с другой стороны, при известных заранее ограничениях по производительности.

Предлагаются два метода синтеза генераторов потока векторов состояния анализируемой ОМС, обеспечивающих выполнение статистических экспериментов с  $GL$ -моделями. Один из них включает в себя линейный ГПСЧ, формирует равновесные векторы и отличается повышенным быстродействием. Другой основан на новой идее

построения автономного генератора, заключающейся в исключении из процесса сдвига определенного разряда выходного регистра в определенные моменты времени под управлением специальной функции, которая, как доказано в работе, всегда существует для любых значений веса и числа разрядов.

**Ключевые слова:** гарантоспособность, отказоустойчивость, многопроцессорные системы, самодиагностирование, *GL*-модели, статистические методы расчета надежности, погрешность расчета, техническая безопасность, генераторы псевдослучайных равновесных векторов.

### **Annotation**

**Romankevych V. Methods and means of dependability technical characteristics` estimation for complex objects` control fault-tolerant multiprocessor systems. - Manuscript.**

Thesis for the academic degree of the Doctor of Engineering science in a specialty 05.13.05 – computer systems and components. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kiev, 2017.

The problem of an organization of self-test of fault-tolerant multiprocessor systems (FTMS) of control is considered, a row of methods of increasing of efficiency of self-testing for different topology of links is offered.

The principles of creation of graph-logical models (*GL*-models) which display behavior of FTMS in a failure flow are considered.

Methods of formation of such models which feature is attributing of Boolean functions to a graph branch, their minimization and conversion by introduction of additional branches or by changeover of rib functions are offered. Boundaries of such conversions are defined.

Methods of calculation of probability of fault-less operation of fault-tolerant multiprocessor systems by execution of statistical experiments with *GL*-models and determination of calculation error are offered.

The method of reliability augmentation of fault-tolerant multiprocessor systems internal reserves using, and also a method of calculation of level of technical safety of the multiprocessor systems with using of *GL*-models is offered.

Methods of synthesis of generators of the pseudorandom equilibrium vectors oriented on execution of statistical experiments with *GL*-models are offered.

**Keywords:** dependability, fault tolerance, the multiprocessor systems, self-diagnosability, *GL*-models, statistical methods of calculation of reliability, calculation error, technical safety, generators of pseudorandom equilibrium vectors.