НАДІЙНІСТЬ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ

УДК 621.396.6.019.3+519.87

Б. Ю. Волочій, В. М. Якубенко, М. М. Змисний
Національний університет "Львівська політехніка"

НАДІЙНІСНА МОДЕЛЬ ВІДМОВОСТІЙКОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ МАЖОРИТАРНОЇ СТРУКТУРИ {3 ІЗ 5} З КОМБІНОВАНИМ СТРУКТУРНИМ РЕЗЕРВУВАННЯМ ТА З ВІДНОВЛЕННЯМ

Описано технічне рішення відмовостійкої радіоелектронної системи відповідального призначення з апаратно-програмною реалізацією, яке формується на етапі системотехнічного проектування у вигляді відмовостійкої системи з мажоритарною структурою типу {3 із 5}. Для подальшої реалізації цього технічного рішення необхідно розв'язати задачу надійнісного структурно-параметричного синтезу. Це можна зробити, визначивши і порівнявши показники надійності всіх доцільних варіантів реалізації запропонованої відмовостійкої системи. Для кожного доцільного варіанта реалізації відмовостійкої системи необхідна надійнісна модель високого ступеня адекватності. Побудова цих надійнісних моделей можлива з використанням методу, в основу якого покладено структурно-автоматну модель відмовостійкої системи. Розроблення структурно-автоматної моделі можна виконати на основі опорного графа станів. У статті наведено розроблений опорний граф станів відмовостійкої системи з мажоритарною структурою типу {3 із 5}.

Ключові слова: надійність, відмовостійка система, надійнісне проектування, мажоритарна структура, ковзне резервування.

B. Volochiy, V. Yakubenko, M. Zmysnyi
Lviv Polytechnic National University

RELIABILITY MODEL OF FAULT-TOLERANT SYSTEM BASED ON THE MAJORITY STRUCTURE {3 OF 5} WITH COMBINED STRUCTURAL REDUNDANCY AND MAINTENANCE

Designing of radio-electronic systems of responsible purpose with hardware-software implementation involves the mandatory provision of their property of fault-tolerance. The property of fault-tolerance are provided by the use of fault-tolerant systems. For these fault-tolerant systems at the stage of system engineering design it is necessary to solve the problem of reliability structural-parametric synthesis. A designer must have a high degree of

adequacy of reliability models of fault-tolerant systems with different configurations to solve such a task.

Wide application for the design of radio electronic systems (RES) of responsible purpose with hardware and software implementation have fault-tolerant systems with majority structure. Fault-tolerant systems with a majority structure have many options for practical implementation. However, not all variants of their implementation have developed reliability models that are suitable for solving the problem of reliability structural-parametric synthesis. In the list of fault-tolerant systems with a majority structure, for which there are no models of the required degree of adequacy, includes a fault-tolerant system in which there are 5 RES in the core and the majority function works according to the rule {3 of 5}. The developed reliability model takes into account the technical implementation features described below.

The suitability of a reliability fault-tolerant system model for solving the problem of reliability synthesis by the multivariate analysis determines the availability of computer support for the development of a reliability model and the solution to the problem of reliability analysis. The basis of technology development of reliability models is the method of developing models of discrete-continuous stochastic systems in the form of states diagram. Implementation of the method involves the development of a structural and automatic model of fault-tolerant system.

In this paper, for a fault-tolerant system with a majority structure {3 of 5}, a developed supporting state diagram is presented and mathematical model is developed in the form of a system of Kolmogorov–Chapman differential equations.

Key words: reliability, fault-tolerant system, reliability designing, majority structure, sliding redundancy.

Вступ

Проектування радіоелектронних систем відповідального призначення з апаратно-програмною реалізацією передбачає обов'язкове забезпечення для них властивості відмовостійкості [1]. Властивість відмовостійкості забезпечується використанням відмовостійких систем, для яких на етапі системотехнічного проектування необхідно розв'язати задачу надійнісного структурно-параметричного синтезу. Для розв'язання такої задачі проектант повинен мати в своєму розпорядженні надійнісні моделі відмовостійких систем високого ступеня адекватності з різними конфігураціями.

Широко застосовують для проектування радіоелектронних систем (РЕС) відповідального призначення з апаратно-програмною реалізацією відмовостійкі системи з мажоритарною структурою [1–17]. Відмовостійкі системи з мажоритарною структурою мають багато варіантів практичної реалізації. Однак не для всіх варіантів їх реалізації розроблено надійнісні моделі, придатні для розв'язання задачі надійнісного структурно-параметричного синтезу. В перелік відмовостійких систем з мажоритарною структурою, для яких немає моделей необхідного ступеня адекватності, входить відмовостійка система, у якої в ядрі п'ять РЕС і мажоритарний елемент працює за правилом {3 із 5}. У розробленій надійнісній моделі враховано особливості технічної реалізації, описані нижче.

Придатність надійнісної моделі відмовостійкої системи для розв'язання задачі надійнісного синтезу через багатоваріантний аналіз визначає наявність комп'ютерної підтримки для розроблення надійнісної моделі та розв'язання задачі надійнісного аналізу. Технологія розроблення моделей, яка забезпечує такі можливості, описана в працях [20–23]. В основу цієї технології покладено метод розроблення моделей дискретно-неперервних стохастичних систем у вигляді графа станів та

переходів. Реалізація методу передбачає розроблення структурно-автоматної моделі відмовостійкої системи. В статтях [20, 22] подано методику розроблення структурно-автоматних моделей на основі опорного графа станів.

В цій статті для відмовостійкої системи з мажоритарною структурою {3 із 5} наведено розроблений опорний граф станів та переходів і сформовано відповідну математичну модель у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена.

Відомі засоби системотехнічного проектування відмовостійких систем із мажоритарною структурою

Аналіз останніх досліджень, пов'язаних з експлуатацією станційних систем на основі мікропроцесорної централізації (МПЦ), яка використовується на метрополітенах та промислових підприємствах, свідчить, що від структури інформаційно-керуючих систем залежать ефективність експлуатації, надійність та функціональна безпечність [12]. Безпечність функціонування систем МПЦ забезпечується найчастіше за рахунок резервування на апаратному рівні, що досягається використанням декількох каналів оброблення інформації. Зазвичай використовують три канали, що реалізують мажоритарний принцип резервування [13, 14]. Активізація виконавчого пристрою (переведення стрілки або ввімкнення сигналу світлофора, що дозволяє рух поїздів) здійснюється тільки тоді, коли збігається відповідна інформація у всіх або у більшості каналів, тобто використовується мажоритарний принцип керування {2 із 3}.

В роботах [3, 4] досліджено вплив на надійність та функціональну безпечність параметрів відновлення у системах МПЦ використання мажоритарної структури {2 із 3}. Для цього запропоновано дві моделі відмовостійкої системи на основі мажоритарної структури (МС) з фіксованим правилом прийняття рішення типу {2 із 3} з відновленням модулів, що входять до складу ядра. Для першої моделі розроблено граф станів і переходів системи МПЦ, в якій не передбачено простої. Граф станів для другої моделі системи МПЦ враховує можливі простої. Під час розроблення моделей прийнято такі припущення: кількість ремонтів необмежена; відновлення завжди успішне; засоби контролю, діагностики та комутації виконують свої функції з ймовірністю одиниця. Розроблені моделі відмовостійкої системи подано у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена. Крім того, в статті [3] автор наводить аналітичні вирази для розрахунку середнього значення тривалості безвідмовної роботи для відмовостійкої РЕС з мажоритарною структурою типу {2 із 3} (1), ймовірності безвідмовної роботи (2), коефіцієнта готовності до безпечної роботи (3).

$$T = \frac{N+5}{6 \cdot l} \tag{1}$$

де $N = {}^{m}\!/_{l}$ – індекс відновлення безпечної роботи об'єкта, λ – інтенсивність небезпечних відмов системи, μ – інтенсивність відновлення системи.

$$P(t) = e^{-\frac{6 \cdot l^2}{5 \cdot l + m} \cdot t} \tag{2}$$

$$K = \frac{N^2 + 3 \cdot N}{N^2 + 3 \cdot N + 6} \tag{3}$$

У роботах [12–14] подано структурну схему системи МПЦ-Д, в якій до складу технічних засобів середнього рівня системи входять три комплекти ЕОМ, які працюють за мажоритарним принципом резервування типу {2 із 3}. Функціональна безпека і безвідмовність системи МПЦ забезпечуються за рахунок використання високонадійної операційної системи реального часу типу QNX, мажоритарного резервування {2 із 3} і гарантованого періодичного контролю справності

каналів обробки інформації. Однак не запропоновано моделей для розрахунку показників надійності таких систем.

У статті [4] розроблено надійнісні моделі відмовостійкої системи на основі мажоритарної структури, які враховують ковзне резервування її робочих модулів та параметри стратегії технічного обслуговування. Проте в розроблених моделях: прийнято припущення про те, що відновлення модулів ядра завжди успішне; не враховано збоїв у роботі засобів контролю та діагностики і ненадійну роботу пристроїв комутації та мажоритарного елемента.

У монографії [16, с. 21–22] подано структурну схему надійності ВС з мажоритарною структурою типу {2 із 3}. Наведено формулу для визначення ймовірності безвідмовної роботи (4), в якій враховано показники надійності модулів ядра і мажоритарного елемента

$$\begin{aligned} R_{TMR/V} &= R_{voter}(t)\sum_{i=2}^{3} R^i(t)\left[1-R(t)\right]^{3-i} = \\ &= R_{voter}(t)\left(3R^2(t)\left[1-R(t)\right]+R^3(t)\right) = \\ &= R_{voter}(t)\left(3R^2(t)-2R^3(t)\right) \end{aligned} \tag{4}$$

де R(t) – ймовірність безвідмовної роботи модуля ядра на інтервалі часу; $R_{voter}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи мажоритарного елемента на цьому інтервалі часу.

У статті [17] запропоновано метод статистичного моделювання надійності на основі використання генераторів випадкових чисел. Розглядається відмовостійка система з мажоритарною структурою типу {2 із 3} з урахуванням процесу відновлення. Розроблена модель дає змогу враховувати час відновлення каналу, що відмовив, проте не враховує: можливість формування ковзного резерву, ненадійну роботу засобів контролю та діагностики, а також мажоритарного елемента, можливість неуспішного відновлення.

У монографії [18, с. 151] наведено формулу для розрахунку середнього значення тривалості безвідмовної роботи для відмовостійкої РЕС з МС типу {2 із 3} (5).

$$MTTF = \frac{5}{6\cdot l}. \tag{5}$$

У статті [19] розроблено моделі відмовостійких РЕС з МС типу {2 із 3} та {3 із 5} та наведено формули для розрахунку середнього значення тривалості безвідмовної роботи для запропонованих моделей (6) та (7) відповідно

$$MTTF_{TMR/Repair} = \frac{5\cdot l + m}{6\cdot l^2}, \tag{6}$$

$$MTTF_{5MR/Repair} = \frac{47\cdot l^2 + 8\cdot l\cdot m + m^2}{60\cdot l^3}, \tag{7}$$

де λ − інтенсивність відмов РЕС; μ − інтенсивність ремонту несправної РЕС.

Проте розроблення моделей здійснено за таких допущень: не враховано ефективності засобів контролю та діагностики; кількість відновлень необмежена; відновлення (ремонт) завжди успішне.

Постановка задачі

Для того, щоб розв’язувати задачі надійнісного синтезу відмовостійкої системи з мажоритарною структурою {3 із 5} і дати відповідні рекомендації для ремонтної служби, а також щодо формування ковзного резерву та структури відмовостійкої системи загалом, необхідно розробити математичну модель з вищим, ніж у відомих моделях, ступенем адекватності.

Отже, актуальне завдання розроблення надійнісної аналітичної моделі відмовостійкої системи на основі мажоритарної структури {3 із 5}. Розроблена модель повинна враховувати

ненадійну роботу засобів контролю та діагностики, засобів комутації, а також неуспішний ремонт технічних систем.

Надалі на основі опорного графа станів буде сформовано структурно-автоматну модель, згідно з методикою, викладеною у статтях [20, 22], і подано прилад розв'язання задачі надійнісного синтезу відмовостійкої системи з мажоритарною структурою {3 із 5}.

Технічні рішення, які закладаються у проектовану відмовостійку систему

Структурна схема проектованої відмовостійкої системи (рис. 1) містить:

- ядро, в яке входять п'ять радіоелектронних систем;
- ковзний резерв, в якому може бути m резервних РЕС (холодний резерв);
- засіб контролю та діагностики (ЗКД);
- комутуючий пристрій (КП);
- мажоритарний елемент (МЕ).

Ремонтна служба (РС) забезпечує відновлення несправних РЕС.

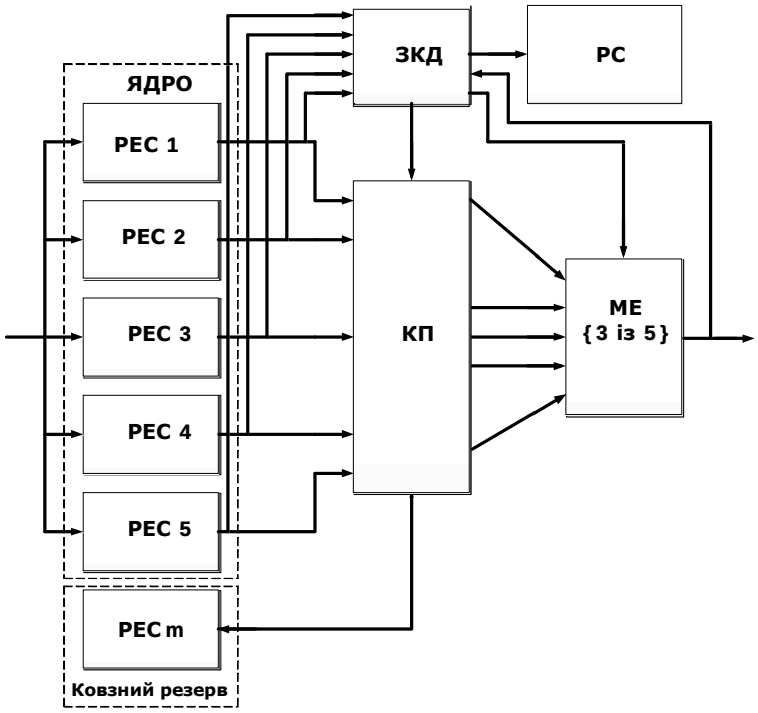

Рис. 1. Структурна схема відмовостійкої системи на основі мажоритарної структури типу {3 із 5} з урахуванням процесу відновлення

Прийняті допущення та вимоги:

- Надійність ЗКД, КП та МЕ значно вища від надійності інших складових ВС. Вважаємо, що тривалість безвідмовної роботи ЗКД, КП та МЕ більша, ніж тривалість експлуатації РЕС.
- Програмне забезпечення РЕС вважається бездефектним. Збої у роботі РЕС з "вини" програмного забезпечення ЗКД виявляє з ймовірністю 1. Усунення його наслідків здійснюється перезавантаженням програмного забезпечення.
- Тривалості всіх процедур, які відбуваються у ВС, мають експоненційний розподіл.

Умови виникнення критичної відмови ВС. Непрацездатність ВС, що розглядається, тобто критична відмова може настати у разі відмови МЕ або у випадку, коли у ядрі ВС залишились дві справні РЕС.

Процедура контролю та діагностики ВС:

- Виявлення порушень працездатності ВС та локалізацію у ній несправної РЕС здійснюють за допомогою ЗКД. Цей засіб порівнює сигнал з виходу МЕ і сигнали з виходів кожної РЕС ядра.
- Процедура контролю та діагностики працездатності РЕС ядра закінчується успішно з ймовірністю $P_{у.к}$ і неуспішно з ймовірністю $(1 - P_{у.к})$.
- Якщо контроль закінчується успішно, то за незбігу сигналу з виходу МЕ і сигналу з виходу однієї з РЕС ядра засіб контролю і діагностики фіксує появу несправної РЕС і подає сигнал у КП та повідомляє РС про наявність несправної РЕС. З цього моменту розпочинається відлік часу процедури відновлення працездатності РЕС, якщо ще не використано всі заплановані відновлення.
- Середнє значення тривалості виявлення несправної РЕС ($t_{виявл}$) порівняно із середніми значеннями тривалостей інших процедур істотно менше. Тому в моделі ВС можна вважати, що ці процеси відбуваються миттєво, не допускаючи перерв у її функціонуванні.
- Якщо контроль неуспішний, то на КП і в РС сигнали не надійдуть. Однак ВС може успішно функціонувати, якщо в ядрі справно функціонує три і більше РЕС. Якщо у ядрі ВС залишились дві справні РЕС, то ВС перейде в стан критичної відмови.

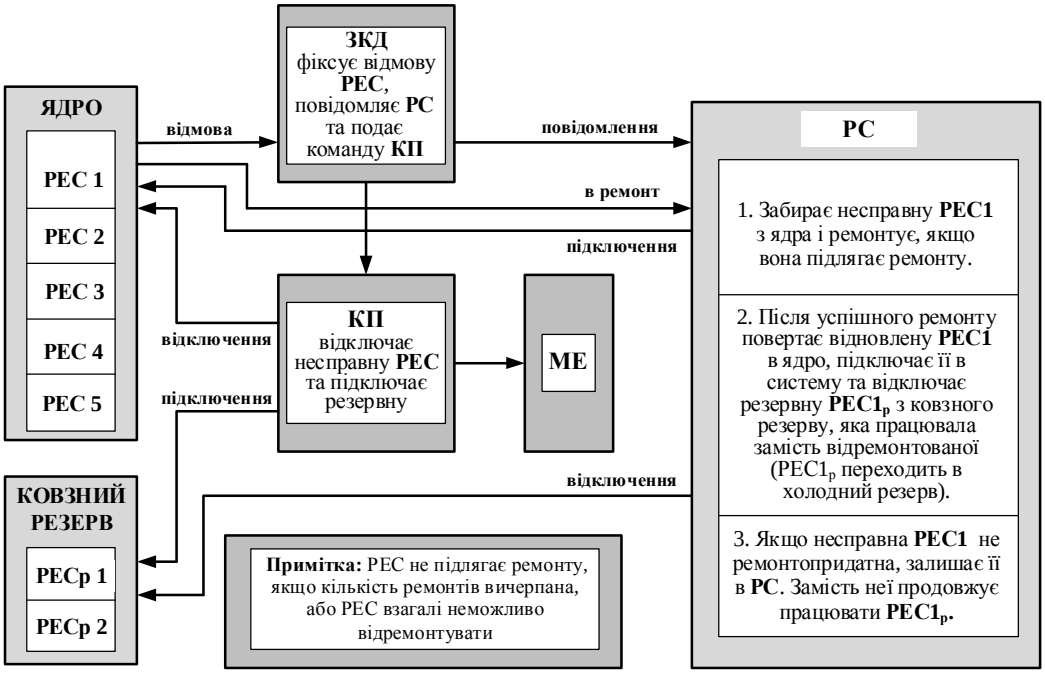

Рис. 2. Схема процесу виявлення несправної РЕС та її відновлення

Процедура комутацій (перемикань):

- Відключення ядра виявленої несправної РЕС і підключення замість неї резервної РЕС з ковзного резерву здійснює КП. Через нього ж сигнали РЕС, що функціонують, передаються до МЕ.
- Процедура перемикання РЕС закінчується успішно з ймовірністю $P_{у.п}$ і неуспішно з ймовірністю $(1 – P_{у.п})$.
- Середнє значення тривалості відключення несправної РЕС ($t_{відкл}$) та середнє значення тривалості підключення РЕС з ковзного резерву ($t_{підкл}$) порівняно із середніми

значеннями тривалостей інших процедур є достатньо малими. Тому в моделі ВС можна вважати, що ці процеси відбуваються миттєво, не допускаючи перерви в її функціонуванні.

- У разі неуспішного перемикання КП не реагує на керуючі сигнали від ЗКД, тобто не відключає несправну РЕС ядра та не підключає резервну РЕС. Однак сигнали від РЕС, що працюють, надходять через нього до МЕ. В цьому разі ВС залишатиметься працездатною, якщо справно функціонують три і більше РЕС. Якщо у разі неуспішного перемикання КП у ядрі ВС виявиться менше від трьох справних РЕС, то ВС перейде в стан критичної відмови.

Відновлення несправних РЕС

- Відновлення працездатності несправних РЕС здійснює РС. Повідомлення про необхідність відновлення виявленої несправної РЕС передається ЗКД в РС одразу ж після виявленої відмови РЕС. Схему процесу виявлення несправної РЕС та її відновлення подано на рис. 2.
- Відлік часу відновлення несправної РЕС розпочинається одразу ж після закінчення процедури її виявлення. Він складається з тривалостей вилучення її з ядра ВС, переміщення у РС, ремонту та підключення після ремонту у ВС.
- Параметром процедури відновлення є середнє значення її тривалості $t_в$. Ефективність процедури відновлення в моделі представлена ймовірністю успішного відновлення.
- Для РЕС, які вийшли з ладу, передбачене повне відновлення (ремонт). Кількість відновлень РЕС обмежена. ЗКД, КП та МЕ відновленню не підлягають.
- Якщо допустима кількість ремонтів не вичерпана, то після виявлення несправні РЕС надходять у ремонт. Коли РС зайнята, то несправну РЕС ставлять в чергу на ремонт. В протилежному випадку несправні РЕС вилучають зі структури ВС.
- Відновлену РЕС вмикають на вільне місце в ядро або в ковзний резерв.

Розроблення опорного графа станів проектованої відмовостійкої системи

Для побудови структурно-автоматної моделі відмовостійкої системи необхідно розробити опорний граф станів та переходів [20]. Для розроблення опорного графа проектованої ВС необхідно передусім задати значення параметрів ВС та визначити базові події, які представляють всі процеси і процедури, закладені в алгоритмі її поведінки, а також зовнішні та внутрішні процеси, з якими взаємодіє ВС протягом всього часу функціонування. Необхідно також обґрунтувати компоненти вектора, який відображатиме стан ВС.

Параметри проектованої ВС, які задаємо для розроблення моделі:

- n – початкова кількість РЕС в ядрі ВС (n=5);
- m – початкова кількість РЕС ковзного резерву (m=2);
- $k_{РЕС}$ – кількість запланованих відновлень РЕС ($k_{РЕС}$=2);
- $\lambda_{РЕС}$ – середнє значення інтенсивності відмов РЕС;
- $\lambda_{МЕ}$ – середнє значення інтенсивності відмов МЕ;
- $t_в$ – середнє значення тривалості процесу відновлення несправної РЕС;
- $P_{у.к}$ – ймовірність успішного контролю і діагностики;
- $P_{у.п}$ – ймовірність успішного перемикання КП;
- $P_{у.в}$ – ймовірність успішного відновлення РЕС.

Визначення базових подій розпочинають з опису процедур, які відображають події поведінки проектованої **ВС** та її взаємодії із зовнішніми процесами (див. табл. 1).

Таблиця 1

Процедури, що відображають поведінку проектованої ВС

№ з/п	Подія, яка відповідає початку процедури	Подія, яка відповідає закінченню процедури	Середнє значення тривалості процедури
1	Початок роботи РЕС (з початку експлуатації ВС або з моменту закінчення відновлення РЕС)	Відмова РЕС	$t_{РЕС} = 1/\lambda_{РЕС}$
2	Початок процесу відновлення несправної РЕС	Закінчення процесу відновлення несправної РЕС	$t_{в}$
3	Початок роботи МЕ (з початку експлуатації ВС)	Відмова МЕ	$t_{МЕ} = 1/\lambda_{МЕ}$
4	Початок процедури виявлення несправної РЕС	Закінчення процедури виявлення несправної РЕС	$t_{виявл}$
5	Початок процедури відключення несправної РЕС	Закінчення процедури відключення несправної РЕС	$t_{відкл}$
6	Початок процедури підключення РЕС з ковзного резерву в ядро	Закінчення процедури підключення РЕС з ковзного резерву в ядро	$t_{підкл}$

Оскільки закінчення процедур вважаються базовими подіями [20, с. 65–68], запишемо на підставі табл. 1 базові події для проектованої ВС:

- **Базова подія 1 (БП1)** – “Відмова РЕС”.
- **Базова подія 2 (БП2)** – “Закінчення процедури відновлення несправної РЕС”.
- **Базова подія 3 (БП3)** – “Відмова МЕ”.
- **Базова подія 4 (БП4)** – “Закінчення процедури виявлення несправної РЕС”.
- **Базова подія 5 (БП5)** – “Закінчення процедури відключення несправної РЕС”.
- **Базова подія 6 (БП6)** – “Закінчення процедури підключення РЕС з ковзного резерву в ядро”.

Оскільки тривалості виявлення несправної РЕС, її відключення та під’єднання РЕС з ковзного резерву значно менші від середнього значення тривалості безвідмовної роботи РЕС, то базові події БП4, БП5 та БП6 зведемо з базовою подією БП1 і позначимо ЗБП4, ЗБП5, ЗБП6.

Будуючи граф станів, кожен стан ВС подамо вектором, який складається з таких компонентів:

V1 – поточне значення кількості працездатних РЕС в ядрі (початкове значення компоненти **V1** дорівнює **n** – кількості РЕС робочої конфігурації ядра);

V2 – поточне значення кількості працездатних РЕС у ковзному резерві (початкове значення компоненти **V2** дорівнює **m** – кількості РЕС у ковзному резерві);

V3 – поточне значення кількості РЕС у черзі на ремонт (початкове значення компоненти **V3** дорівнює нулю, кінцеве значення – $\mathbf{k_{РЕС}}$);

V4 – поточне значення кількості використаних ремонтів РЕС (початкове значення компоненти **V4** дорівнює **0**, кінцеве значення – $\mathbf{k_{РЕС}}$);

V5 – стан пристрою комутації (**V6 = 1** – справний; **V6 = 0** – частково несправний, початкове значення компоненти **V6** = **1**).

V6 – стан мажоритарного елемента (**V6 = 1** – справний; **V6 = 0** – несправний, (початкове значення компоненти **V6** = **1**).

Розроблення опорного графа станів ВС здійснюємо за методикою, запропонованою в [20, 22], методом логічного аналізу, який передбачає подання результатів у вигляді табл. 2.

Розроблення опорного графа станів та переходів виконаємо, починаючи з початкового стану системи (**ПС,** крок 1). Для нього визначаються актуальні базові події та здійснюється послідовне формування векторів станів **ВС** на основі визначених базових подій. Ця процедура повторюється для усіх сформованих наступних станів. Розроблений опорний граф станів та переходів у вигляді таблиці займає чотири сторінки. Тому наведемо і прокоментуємо фрагменти цієї таблиці, в яких подано всі типові ситуації процесу розроблення опорного графа станів.

Для початкового стану ВС (табл. 2) актуальними будуть лише дві базові події: БП1 – "Відмова РЕС" (крок 2) та БП3 **–** "Відмова МЕ" (крок 3). Для БП1 в цьому стані актуальними будуть усі три зведені базові події: ЗБП4 – "Закінчення процедури виявлення несправної РЕС"; ЗБП5 **–** "Закінчення процедури відключення несправної РЕС"; ЗБП6 **–** "Закінчення процедури підключення РЕС з ковзного резерву в ядро". Тому після БП1 маємо три альтернативні переходи (продовження): успішний контроль ЗКД і успішне перемикання КП, неуспішний контроль та успішний контроль і неуспішне перемикання.

Перший перехід відбувається з ймовірністю $P_{у.к}P_{у.п}$. Відповідно РЕС, що відмовила, надходить у чергу на ремонт, а на її місце КП підключає резервну РЕС.

Другий перехід відбувається з ймовірністю $(1–P_{у.к})$. Відповідно РЕС відмовляє і кількість працездатних РЕС в ядрі зменшується. Але через неуспішний контроль вона не виявлена, а отже, не поставлена в чергу на ремонт і на її місце не підключена РЕС з ковзного резерву.

Третій перехід відбувається з ймовірністю $P_{у.к}(1–P_{у.п})$. Відповідно ЗКД виявили факт відмови РЕС, проте підімкнення РЕС з ковзного резерву не здійснено у зв'язку з частковою відмовою КП.

Базова подія БП3 є як у початковому стані ВС, так і в її наступних станах, що розглядаються, оскільки в кожному з них може виникнути ситуація з втратою працездатності мажоритарного елемента.

У другому стані, який отримано після успішного виявлення несправної РЕС, успішного підключення резервної РЕС та переміщення несправної РЕС в ремонт, актуальними будуть три базові події: БП1 – "Відмова РЕС"; БП2 – "Закінчення процедури відновлення несправної РЕС"; БП3 – "Відмова МЕ" (кроки 4, 5, 6). З БП1 треба врахувати три зведені базові події: ЗБП4, ЗБП5, ЗБП6, які зумовлюють три альтернативні продовження. Після БП2 маємо два альтернативні продовження, тобто успішне відновлення несправної РЕС з ймовірністю $P_{у.в}$ та неуспішне – з ймовірністю $(1–P_{у.в})$.

У третьому стані, який виник після неуспішного виявлення несправної РЕС, актуальними будуть лише дві базові події: БП1 – "Відмова РЕС" та БП3 **–** "Відмова МЕ" (кроки 7, 8). Базова подія БП2 буде відсутня, оскільки в цьому стані несправна РЕС не надійшла в ремонт.

У четвертому стані, який настав після успішного виявлення несправної РЕС та неуспішного підключення резервної РЕС внаслідок часткової несправності КП (кроки 9, 10, 11), актуальними є усі три базові події: БП1, БП2, БП3. З БП1 треба враховувати зведену базову подію ЗБП4, яка зумовлює два альтернативні продовження за успішного або неуспішного результатів контролю з ймовірностями $P_{у.к}$ та $(1 – P_{у.к})$.

У п'ятому стані, який отримано після успішного виявлення несправної РЕС та неуспішного підключення резервної РЕС внаслідок відсутності РЕС в ковзному резерві, актуальні три базові події: БП1, БП2, БП3. З БП1 треба враховувати зведену базову подію ЗБП4, яка зумовлює два альтернативні продовження. Базова подія БП2 в цьому стані також наявна, оскільки в ремонті дві несправні РЕС.

Зауважимо, що, успішно виявивши несправну РЕС, ремонтна служба забирає її, а також всі інші несправні РЕС, які не виявлено раніше. Їх ремонт здійснюється по черзі, а кількість ремонтів не може перевищити заплановану кількість.

Таблиця 2

Фрагмент розроблення опорного графа станів і переходів проектованої відмовостійкої системи, в якому розглядаються стани з першого по п'ятий

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна базова подія	Ймовірність альтернативного продовження процесу	Вектор стану						№ стану	Перехід зі стану в стан	Інтенсивність переходу
			V1	V2	V3	V4	V5	V6			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ПС	-	5	2	0	0	1	1	1	-	-
2	1БП1 (ЗБП4, ЗБП5, ЗБП6)	$P_{у.к.}\ P_{у.п.}$	5	1	1	0	1	1	2	1→2	$5\lambda_{ТС}\ P_{у.к.}\ P_{у.п.}$
		$1–P_{у.к.}$	4	2	0	0	1	1	3	1→3	$5\lambda_{ТС}\ (1–P_{у.к.})$
		$P_{у.к}(1–P_{у.п..})$	4	2	1	0	0	1	4	1→4	$5\lambda_{ТС}P_{у.к.}(1–P_{у.п.})$
3	1БП3	–	5	2	0	0	1	0	КВ	1→КВ	$\lambda_{МЕ}$
4	2БП1 (ЗБП4, ЗБП5, ЗБП6)	$P_{у.к.}\ P_{у.п.}$	5	0	2	0	1	1	5	2→5	$5\lambda_{ТС}\ P_{у.к.}\ P_{у.п}$
		$1–P_{у.к.}$	4	1	1	0	1	1	6	2→6	$5\lambda_{ТС}\ (1–P_{у.к})$
		$P_{у.к}(1–P_{у.п.})$	4	1	2	0	0	1	7	2→7	$5\lambda_{ТС}P_{у.к.}(1–P_{у.п.})$
5	2БП2	$P_{у.в.}$	5	2	0	1	1	1	8	2→8	$\mu\ P_{у.в}$
		$1–P_{у.в.}$	5	1	0	1	1	1	9	2→9	$\mu\ (1–P_{у.в})$
6	2БП3	–	5	1	1	0	1	0	КВ	2→КВ	$\lambda_{МЕ}$
7	3БП1	$P_{у.к.}\ P_{у.п.}$	4	1	2	0	1	1	10	3→10	$4\lambda_{ТС}\ P_{у.к.}\ P_{у.п.}$
		$1–P_{у.к.}$	3	2	0	0	1	1	11	3→11	$4\lambda_{ТС}\ (1–P_{у.к.})$
		$P_{у.к}(1–P_{у.п..})$	3	2	2	0	0	1	12	3→12	$4\lambda_{ТС}P_{у.к.}(1–P_{у.п.})$
8	3БП3	–	4	2	0	0	1	0	КВ	3→КВ	$\lambda_{МЕ}$
9	4БП1 (ЗБП4)	$P_{у.к}$	3	2	2	0	0	1	12	4→12	$4\lambda_{ТС}\ P_{у.к.}$
		$1–P_{у.к}$	3	2	1	0	0	1	13	4→13	$4\lambda_{ТС}(1–P_{у.к})$
10	4БП2	$P_{у.в.}$	5	2	0	1	0	1	14	4→14	$\mu\ P_{у.в}$
		$1–P_{у.в.}$	4	2	0	1	0	1	15	4→15	$\mu\ (1–P_{у.в})$
11	4БП3	–	4	2	1	0	0	0	КВ	4→КВ	$\lambda_{МЕ}$
12	5БП1 (ЗБП4)	$P_{у.к.}$	4	0	2	0	1	1	16	5→16	$5\lambda_{ТС}\ P_{у.к.}$
		$1–P_{у.к.}$	4	0	2	0	1	1	16	5→16	$5\lambda_{ТС}(1–P_{у.к})$
13	5БП2	$P_{у.в.}$	5	1	1	1	1	1	17	5→17	$\mu\ P_{у.в}$
		$1–P_{у.в.}$	5	0	1	1	1	1	18	5→18	$\mu\ (1–P_{у.в})$
14	5БП3	–	5	0	2	0	1	0	КВ	5→КВ	$\lambda_{МЕ}$

Розглянемо ситуацію, яку ілюструє наступний фрагмент розробленого графа станів на прикладі 14-го стану ВС (див. табл. 3). У чотирнадцятому стані, який отримано після успішного

виявлення несправної РЕС та неуспішного підключення резервної РЕС внаслідок часткової втрати працездатності КП, актуальними є дві базові події: БП1, БП3. З БП1 треба враховувати одну зведену базову подію ЗБП4, яка зумовлює два альтернативні продовження.

Таблиця 3

Фрагмент розроблення опорного графа станів і переходів проектованої відмовостійкої системи, в якому розглядається 14-й стан

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
36	14БП1 (ЗБП4)	$P_{у.к.}$	4	2	1	1	0	1	25	14→25	$5\lambda_{ТС} P_{у.к.}$
		$1–P_{у.к.}$	4	2	0	1	0	1	15	14→15	$5\lambda_{ТС}(1–P_{у.к})$
37	14БП3	–	5	2	0	1	0	0	КВ	14→КВ	$\lambda_{МЕ}$

Розглянемо ще одну ситуацію, яку ілюструє наступний фрагмент розробленого графа станів на прикладі 32-го, 50-го та 51-го станів ВС (див. табл. 4 і табл. 5). Якщо кількість запланованих ремонтів РЕС вичерпана (V4=2) (табл. 4), виявлені несправні РЕС у ремонт не передаються, а вилучаються із системи. Для таких станів БП2 не актуальна, а з БП1 треба враховувати три зведені базові події, які зумовлюють три альтернативні переходи (продовження), якщо КП справний і в ковзному резерві наявні РЕС (стан 32, кроки 85, 86).

Таблиця 4

Фрагмент розроблення опорного графа станів і переходів проектованої відмовостійкої системи, в якому розглядається 32-й стан

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
85	32БП1 (ЗБП4, ЗБП5, ЗБП6)	$P_{у.к.} P_{у.п.}$	5	1	0	2	1	1	33	32→33	$5\lambda_{ТС} P_{у.к.} P_{у.п.}$
		$1–P_{у.к.}$	4	2	0	2	1	1	47	32→47	$5\lambda_{ТС} (1–P_{у.к.})$
		$P_{у.к}(1–P_{у.п..})$	4	2	0	2	0	1	41	32→41	$5\lambda_{ТС}P_{у.к.}(1–P_{у.п.})$
86	32БП3	–	5	2	0	2	1	0	КВ	32→КВ	$\lambda_{МЕ}$

В іншому випадку з БП1 треба враховувати лише одну зведену базову подію ЗБП4, яка зумовлює два альтернативні переходи (продовження): успішний та неуспішний результати контролю (табл. 5, стан 50 та 51, кроки 124–127).

Таблиця 5

Фрагмент розроблення опорного графа станів і переходів проектованої відмовостійкої системи, в якому розглядаються 50-й та 51-й стани

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
124	50БП1 (ЗБП4)	$P_{у.к.}$	2	0	0	2	1	1	КВ	50→КВ	$3\lambda_{ТС} P_{у.к.}$
		$1–P_{у.к.}$	2	0	0	2	1	1	КВ	50→КВ	$3\lambda_{ТС} (1–P_{у.к.})$
125	50БП3	–	3	0	0	2	1	0	КВ	50→КВ	$\lambda_{МЕ}$
126	51БП1 (ЗБП4, ЗБП5, ЗБП6)	$P_{у.к.} P_{у.п.}$	3	1	0	2	1	1	49	51→49	$3\lambda_{ТС} P_{у.к.} P_{у.п.}$
		$1–P_{у.к.}$	2	2	0	2	1	1	КВ	51→КВ	$3\lambda_{ТС} (1–P_{у.к.})$
		$P_{у.к}(1–P_{у.п..})$	2	2	0	2	0	1	КВ	51→КВ	$3\lambda_{ТС}P_{у.к.}(1–P_{у.п.})$
127	51БП3	–	3	2	0	2	1	0	КВ	51→КВ	$\lambda_{МЕ}$

На основі цього графа станів можна сформувати структурно-автоматну модель, згідно з методикою, викладеною в статтях [20, 22]. Своєю чергою, структурно-автоматна модель разом з програмним засобом ASNA забезпечить можливість розв’язання задачі надійнісного синтезу відмовостійкої системи із мажоритарною структурою {3 із 5}.

Математична модель проектованої відмовостійкої системи

Розроблений граф станів може мати і традиційне використання. На його основі формується математична модель відмовостійкої системи у вигляді системи диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена, за допомогою якої можна визначати показники надійності проектованої відмовостійкої системи (ймовірність безвідмовної роботи на інтервалі експлуатації та середнє значення тривалості безвідмовної роботи). Розроблений граф станів проектованої відмовостійкої системи має 51 стан та 224 переходи. Отже, математична модель проектованої ВС, тобто система диференціальних рівнянь Колмогорова−Чепмена, містить 51 рівняння:

$$
\begin{aligned}
&\frac{\partial P_1(t)}{\partial t} = -[5l_{PEC}P_{у.к}P_{у.п} + 5l_{PEC}(1-P_{у.к}) + 5l_{PEC}P_{у.к}(1-P_{у.п}) + l_{ME}]P_1(t);\\
&\frac{\partial P_2(t)}{\partial t} = 5l_{PEC}P_{у.к}P_{у.п}P_1(t) - [5l_{PEC}P_{у.к}P_{у.п} + 5l_{TC}(1-P_{у.к}) + 5l_{PEC}P_{у.к}(1-\\
&-P_{у.п}) + mP_{у.в} + m(1-P_{у.в}) + l_{ME}]P_2(t);\\
&\frac{\partial P_3(t)}{\partial t} = 5l_{PEC}P_{у.к}(1-P_{у.п})P_2(t) - [4l_{PEC}P_{у.к}P_{у.п} + 4l_{PEC}(1-P_{у.к}) +\\
&+4l_{PEC}P_{у.к}(1-P_{у.п}) + l_{ME}]P_3(t);\\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\\
&\frac{\partial P_{51}(t)}{\partial t} = 4l_{PEC}(1-P_{у.к})P_{47}(t) - [3l_{PEC}P_{у.к}P_{у.п} + 3l_{PEC}(1-P_{у.к}) +\\
&+3l_{PEC}P_{у.к}(1-P_{у.п}) + l_{ME}]P_{51}(t).
\end{aligned}
\tag{8}
$$

Висновки

Розроблено опорний граф відмовостійкої системи на основі мажоритарної структури типу {3 із 5}, в якій враховано ненадійну роботу засобів контролю та діагностики, засобів комутації, а також неуспішний ремонт радіоелектронних систем.

У розробленому опорному графі станів враховано запропонований варіант надійнісної поведінки відмовостійкої системи. На основі розробленого опорного графа сформовано математичну модель відмовостійкої системи у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь, яка може практично використовуватись для розв’язання задачі надійнісного аналізу.

Наступним етапом буде розроблення структурно-автоматної моделі відмовостійкої системи на основі вже розробленого опорного графа станів та переходів, а також формування методики розв’язання задачі надійнісного синтезу.

1. Бахмач Е. С., Герасименко А. Д., Головир В. А., Сиора А. А., Скляр В. В., Токарев В. И., Харченко В. С. Отказобезопасные информационно-управляющие системы на программируемой логике / Под ред. Харченко В. С., Скляра В. В. – Национальный аэрокосмический университет “ХАИ”, Научно-производственное предприятие “Радий”, 2008. – 380 с. 2. Кустов В. Ф.

Математичні моделі функційної безпечності та безвідмовності відновлюваних технічних засобів у разі використання мажоритарного резервування "2" із "3" / В. Ф. Кустов // Збірник наукових праць ДонІЗТ. Автоматика, телемеханіка, зв'язок. – 2010. – № 23. – С. 5–13. 3. Панченко С. В. Дослідження мажоритарної структури системи з відновленням / С. В. Панченко, Н. Г. Панченко, А. А. Меліхов // Науково-технічний журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті". – 2010. – № 5. – С. 62–68. 4. Мандзій Б. А. Оцінювання показників надійності відмовостійкої системи на основі мажоритарної структури з врахуванням параметрів стратегії аварійного відновлення / Б. А. Мандзій, Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, М. М. Змисний, І. В. Кулик // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Радіотехніка та телекомунікації. – 2011. – № 705. – С. 216–224. 5. КАУ РБ РКК "Наземный старт" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.apsystem.ru/land_launch.shtml. 6. Ольшевский Ю. Н. Перспективы развития систем управления и защиты ядерных энергетических реакторов типа ВВЭР-1000 / Ю. Н. Ольшевский, Г. А. Жемчугов, А. О. Мирошник, Т. Н. Галкина // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2001. – С. 188–196. 7. Ястребенецкий М. А., Васильченко В. Н., Виноградская С. В. и др. Безопасность атомных станций: Информационные и управляющие системы (Безпека АЕС. Інформаційні та керуючі системи) / Под ред. М. А. Ястребенецкого. – К.: Техніка, 2004. – 472 с. 8. Sklyar V. Reliability and Availability Analysis of FPGA-based Instrumentation and Control Systems / V. Sklyar, V. Kharchenko, A. Siora, S. Malokhatko, V. Golovir, Yu. Beliy // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM): proceedings of the 11th International Conference CADSM. – 2011. – P. 27−33. 9. Кривоносов А. И. Структурно-алгоритмическая организация и модели надежности мажоритарно-резервированных систем / А. И. Кривоносов, Н. К. Байда, А. А. Кулаков, В. С. Харченко, Н. П. Благодарный // Космічна наука і технологія. – 1995. – № 1. – С. 74–79. 10. Lala J. H. A Design Approach for Ultra Reliable Real-Time / J. H. Lala, R. B. Harper, L. S. Alger // Systems IEEE Computer. – 1991. – P. 12–22. 11. Бочков К. А. Методы обеспечения безопасности в микропроцессорных системах железнодорожной автоматики и телемеханики: учеб. пособ. для студентов транспортных специальностей высших учебных заведений / К. А. Бочков, С. Н. Харлап. – Гомель: БелГУТ, 2001. – 84 с. 12. Кустов В. Ф. Дослідження функційної безпечності системи МПЦ-Д / В. Ф. Кустов, О. В. Давидчук // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. Автоматика та ком'ютерні системи управляння рухом поїздів. – 2010, вип. 118. – С. 7–12. 13. Кустов В. Ф. Дослідження функційної безпечності мікропроцесорної системи типу МПЦ-Ц / В. Ф. Кустов, С. В. Осадчий // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. Автоматика та комп'ютерні системи управляння рухом поїздів. – 2011, вип. 126. – С. 72–76. 14. Kim Min-Seok Reliability Analysis for Train Control System by Hardware Redundancy Architecture in Fault Tolerance System /Min-Seok Kim, Min-Kyu Kim, Jong-Woo Lee // Journal of International Council on Electrical Engineering. – 2011. – № .2. – P. 140–144. 15. TMS1000-R triple modular redundancy for turbine control systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.turbinetech.com/pdf/TMS-1000R_Rev1-7.pdf. 16. Koren Israel Fault tolerant systems / Israel Koren, C. Mani Krishna // Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier, 2007. – 378 p. 17. Федухин А. В. Моделирование надежности восстанавливаемой резервированной системы со структурой типа "k из n" / А. В. Федухин // Математичні машини і системи. – 2008. – № 4. – С. 189–193. 18. Shooman Martin L. Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design / Martin L. Shooman. – John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002. – 528 p. 19. Sherif Yacoub Automating the Analysis of Voting Systems / Sherif Yacoub, Xiaofan Lin, Steve Simske, John Burns // Software Reliability

Engineering. ISSRE. – 2003. – P. 203–214. 20. Федасюк Д. В., Волочій С. Б. Методика розроблення структурно-автоматних моделей дискретно-неперервних стохастичних систем // Науково-технічний журнал "Радіоелектронні і комп'ютерні системи". – Харків "ХАІ" 2016. – № 6(80). – С. 24–34. 21. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем: монографія / Ю. Я. Бобало, Б. Ю. Волочій, О. Ю. Лозинський, Б. А. Мандзій, Л. Д. Озірковський, Д. В. Федасюк, С. В. Щербовських, В. С. Яковина. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 300 с. 22. Fedasyuk D. Method of Developing the Structural-Automaton Models of Fault-Tolerant Systems [Text] / Dmytro Fedasyk, Serhiy Volochiy // Proceedings 14th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)", 21–25 February 2017, Polyana, Ukraine. – P. 22–26. 23. Волочій Б. Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем / Б. Ю. Волочій. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2004. – 220 с.