

Б. Ю. Волочій¹, В. М. Якубенко¹, Ю. П. Сальник², М. М. Змисний¹

¹ Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

² Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТАРІННЯ МОДУЛІВ ЯДРА ВІДМОВОСТІЙКОЇ СИСТЕМИ МАЖОРИТАРНОГО ТИПУ НА ЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЇЇ НАДІЙНОСТІ

Анотація. Розроблена для проведення досліджень модель відмовостійкої системи мажоритарного типу дає змогу відтворювати будь-яку крутизну зростання інтенсивності відмов модулів ядра, тобто різні швидкості їх старіння. Показано метод урахування зростання інтенсивності відмов в надійнісній моделі відмовостійкої системи мажоритарного типу. Метод базується на гіпотезі про те, що перша відмова модуля в ядрі мажоритарної структури «повідомляє» про близькість вичерпання експлуатаційного ресурсу і в інших модулях ядра. Тому вважати, що після заміни несправного модуля резервним інші модулі ядра мають початковий ресурс працездатності є неправильним. З використанням запропонованого методу розроблено надійнісну модель відмовостійкої системи мажоритарного типу {2 із 3} з ковзним резервуванням модулів ядра та з урахуванням залежності інтенсивності їх відмов від тривалості експлуатації. Проведені порівняльні дослідження показали суттєву різницю між значеннями показника надійності, визначеного без урахування і з урахуванням спрацьованого експлуатаційного ресурсу модулів ядра після заміни несправного модуля резервним.

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

1. Вступ та постановка задачі

Відмовостійкі системи мажоритарного типу (ВСМТ), експлуатація яких на тривалих інтервалах часу експлуатації не передбачає технічного обслуговування (ТО) і ремонту, поряд з відомою перевагою щодо маскування відмов, мають суттєвий недолік. Ресурс всіх модулів ядра спрацьовується від початку експлуатації об'єкта, який спроектовано з використанням такого способу забезпечення відмовостійкості (надійності). Збільшувати тривалість перебування ВСМТ в працездатному стані можливо за допомогою ковзного резервування модулів ядра. Надійнісні моделі таких ВСМТ є відомими [1, с. 92 – 111; 2; 3; 4]. Однак ці моделі не враховують ту обставину, що відмова першого модуля в ядрі є одночасно сигналом про те, що ресурс решти модулів також спрацьовано. Тому після заміни несправного модуля в ядрі резервним модулем неправильно вважати, що середнє значення тривалості роботи до відмови буде однаковим для решти модулів ядра. Отже інтенсивність відмов модулів, що залишилися працювати в ядрі є більшою, ніж у нового, встановленого під час заміни, модуля. Відповідно при проектуванні ВСМТ для підвищення ступеня адекватності моделі необхідно враховувати дану обставину.

Врахування в надійнісних моделях ВСМТ елементної бази є важливою проблемою. Про це свідчать наявність стандартів [5; 6], директивних документів [7; 8], публікації статей по цій тематиці [9; 10].

Важливим для практики розв'язання задач надійнісного синтезу ВСМТ є:

1) гарантоване забезпечення заданого терміну їх безперервної і безвідмовної роботи без ТО;

2) дотримання обмежень щодо маси та об'єму їх реалізації, які визначають допустиму кількість резервних модулів.

Для розв'язання таких задач треба мати надійнісну модель ВСМТ, яка забезпечує високу достовірність значень показників її надійності. Достовірність значень показників надійності залежить від ступеня адекватності моделі. Ступінь адекватності моделі визначає те, що в ній враховані: інтенсивності відмов модулів ядра та мажоритарного елемента, показники функціональності засобу контролю і діагностики, засобу комутації (перемикання), наявність певної кількості резервних модулів. Крім цього постановкою задачі передбачено врахування в моделі вичерпання експлуатаційного ресурсу модулів, які працюють в ядрі мажоритарної структури. Вважаємо, що вичерпання експлуатаційного ресурсу модулів відповідає зростанню значення показника їх надійності, а саме «інтенсивності відмов».

2. Стан математичного забезпечення, призначеного для аналізу надійності відмовостійких систем мажоритарного типу з урахуванням старіння елементної бази модулів ядра

Незважаючи на широке використання відмовостійких систем мажоритарного типу, залишаються актуальними задачі розроблення методів, моделей та методик, придатних для розв'язання задач їх надійнісного синтезу. В статті [9] представлено надійнісні моделі інформаційно-керуючих систем з дворівневою і багаторівневою мостиковою мажоритарною структурою, в яких враховані особливості розподіленої реалізації мажоритарних елементів при багатоканальній організації системи. Запропоновані моделі забезпечують підвищену достовірність оцінювання безвідмовності інформаційно-керуючих систем. В монографії [10] наведено аналітичні формули для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи систем, в яких інтенсивність відмов окремих модулів є функцією часу. В основу цих формул покладено закон розподілу Вейбулла.

В статті [11] продемонстровано підхід до розроблення імітаційної моделі для оцінювання надійності багатOVERСІЙНИХ мажоритарно-резервованих систем, з врахуванням різних законів розподілу для тривалостей безвідмовної роботи апаратних та програмних засобів. Проте в самій статті подано надійнісну модель ВСМТ з версійним резервуванням програмного засобу та з експоненційним законом розподілу інтервалів часу між відмовами апаратних та програмних засобів.

В монографії [12, с. 26] авторами представлено формулу (1) для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи ВСМТ з довільною кількістю модулів в ковзному резерві:

$$R_{hybrid}(t) = R_{voter}(t)R_{rec}(t) \times \left\{ 1 - mR(t)[1 - R(t)]^{m-1} - [1 - R(t)]^m \right\}, \quad (1)$$

де $R_{voter}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи мажоритарного елемента; $R_{rec}(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи комутуючого пристрою; $R(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи модуля ядра; m – загальна кількість модулів у ВСМТ ($m = 3 + k$, k – кількість резервних модулів).

За результатами проведеного дослідження автор робить висновок про доцільність використання ВСМТ з ковзним резервуванням модулів ядра. Така відмовостійка система забезпечує кращі показники надійності. Проте у формулі (1) не враховано показник функціональності засобу контролю та діагностики. А також прийнято, що інтенсивність відмов модулів є постійною, тобто не залежить від тривалості їх експлуатації.

В монографії [13, с. 51] запропоновано формулу (2) для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи ВСМТ, в якій надійність кожного з трьох модулів ядра є різною:

$$R_{TMR} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 + (1 - R_1) \cdot R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot (1 - R_2) \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2 \cdot (1 - R_3), \quad (2)$$

де R_1, R_2, R_3 – ймовірності безвідмовної роботи 1-го, 2-го і 3-го модулів ядра.

Однак в цій формулі не враховані: показники функціональності засобу контролю та діагностики, використання ковзного резерву, зростання інтенсивності відмов модулів, що продовжують працювати після першої відмови одного з модулів ядра.

У статті [14] подано формули для визначення коефіцієнта готовності і експлуатаційної ймовірності безвідмовної роботи ВСМТ. Однак запропоновані формули не враховують зростання інтенсивності відмов модулів ядра і прийнято допущення, що мажоритарний елемент є абсолютно надійним.

В монографії [15] подано формули для розрахунку середнього значення тривалості безвідмовної роботи ВСМТ, в яких враховано лише інтенсивність відмов модулів ядра.

В статті [16] представлений огляд досліджень присвячених аналізу надійності ВСМТ та надійнісну модель ВСМТ з правилом голосування {2 із 3}, в

якій враховано зростання інтенсивності відмов (ефект старіння) модулів, що продовжують працювати після відмови одного з модулів ядра та наявність двох резервних модулів. Однак в цій моделі використано традиційне «хлибне» визначення інтенсивності відмов ядра мажоритарної структури, як сума інтенсивностей відмов модулів ядра. Закладення в модель такого способу визначення інтенсивності відмов ядра мажоритарної структури дає суттєве заниження значень показників надійності ВСМТ. Наявність в моделі двох резервних модулів без можливості зміни їх кількості обмежує її використання. Наприклад, якщо треба визначити кількість резервних модулів на задану тривалість експлуатації ВСМТ без ТО.

Отже на основі проведеного аналізу публікацій за темою дослідження зроблено висновок про те, що відсутня надійнісна модель ВСМТ, в якій враховано зростання інтенсивності відмов модулів ядра, яка має місце в процесі її тривалої експлуатації, необхідність (можливість) зміни кількості резервних модулів, реальну надійність мажоритарного елемента, показники функціональності засобу контролю та діагностики модулів ядра і комутатора ковзного резерву.

3. Конфігурація відмовостійкої системи мажоритарного типу

Вирішення поставленої задачі проведено для ВСМТ з правилом голосування {2 із 3}, яка має в ядрі три програмно-апаратні модулі (ПАМ) і мажоритарний елемент (МЕ) (рис. 1). Надійність такої ВСМТ підвищують введенням в її структуру ковзного резерву, що складається з декількох додаткових ПАМ. Ці ПАМ не задіяні (холодний резерв) і підключаються за допомогою комутуючого пристрою (КП) замість несправних ПАМ ядра, виявлених засобом контролю і діагностики (ЗКД). Їх кількість визначають, на основі врахування надійності ПАМ та заданої тривалості безвідмовної роботи ВСМТ.

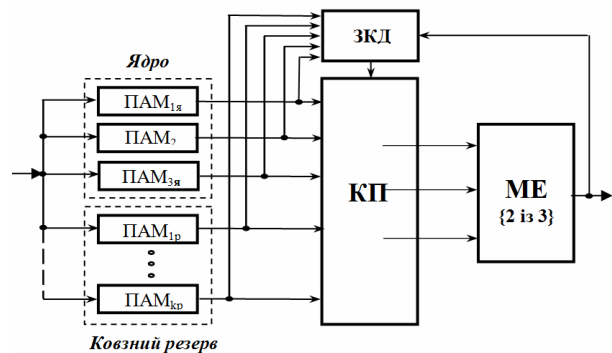


Рис. 1. Структурна схема ВСМТ з правилом голосування {2 із 3} та з ковзним резервом

4. Спосіб врахування в моделі відмовостійкої системи зростання інтенсивності відмов програмно-апаратних модулів ядра

При експлуатації ВСМТ всі працездатні ПАМ ядра починають роботу одночасно. В результаті з часом їх експлуатаційний ресурс вичерпується. Пе-

рша відмова одного з модулів ядра ВСМТ свідчить про те, що його ресурс вичерпано і через деякий час слід очікувати відмов другого і третього модулів ядра. Вважаємо, що для цих модулів розпочався перший етап старіння. Тому показник їх надійності «середнє значення тривалості безвідмовної роботи» буде суттєво зменшеним. Тому правильним рішенням при моделюванні ВСМТ буде врахування наслідків старіння зростанням інтенсивності відмов ПАМ, що залишилися в ядрі. Таке врахування в розробленій моделі здійснено наступним чином. Від початку експлуатації ВСМТ і до моменту відмови першого модуля інтенсивність відмов всіх модулів ядра позначимо $\lambda_{1ПАМ}$.

Після відмови першого модуля розпочався перший етап старіння для другого та третього модулів. Тому значення інтенсивностей відмов другого і третього модулів зростуть та в моделі отримують позначення $\lambda_{2ПАМ}$. Разом з цим, в ядро мажоритарної структури замість непрацездатного, включається перший резервний ПАМ, інтенсивність відмов якого має початкове значення $\lambda_{1ПАМ}$.

Після відмови другого модуля розпочався другий етап старіння для третього модуля. Тому значення інтенсивності відмов третього ПАМ зростає та в моделі отримує позначення $\lambda_{3ПАМ}$. Разом з цим в ядро ВСМТ замість непрацездатного включається другий резервний ПАМ, інтенсивність відмов якого має початкове значення $\lambda_{1ПАМ}$. Зауважимо, що при цьому інтенсивність відмов резервного модуля, включеного в ядро першим не збільшуємо. Таке рішення обумовлено тим, що середнє значення тривалості безвідмовної роботи двох модулів першої трійки після відмови першого модуля є значно меншим, ніж тривалість безвідмовної роботи нового модуля. За аналогічним обґрунтуванням не збільшуємо інтенсивність відмов цього резервного модуля, і після відмови третього модуля першої трійки.

Після відмови третього ПАМ в ядро ВСМТ замість непрацездатного включається третій резервний ПАМ. Інтенсивність відмов цього модуля має початкове значення $\lambda_{1ПАМ}$. Зауважимо, що і після цієї події всі три резервні модулі, включені в ядро мають початкове значення інтенсивності відмов.

На рис. 2 показана часова діаграма функціонування ВСМТ та трьома резервними модулями і безвідмовними на інтервалі часу експлуатації засобами ЗКД, КП і МЕ.

Після відмови резервного ПАМ підключеного першим (будь-якого з трьох) ВСМТ зберігає працездатність до відмови одного з двох резервних модулів, що залишилися.

Під час розроблення надійнісної моделі ВСМТ із трьох модулів в ядрі та з ковзним резервуванням, переходи із стану в стан в графі станів відбуваються з такими інтенсивностями:

1) із станів, які мають в ядрі 3 нові модулі, інтенсивність переходів визначає початкове значення інтенсивності відмов одного модуля – $\lambda_{1ПАМ}$;

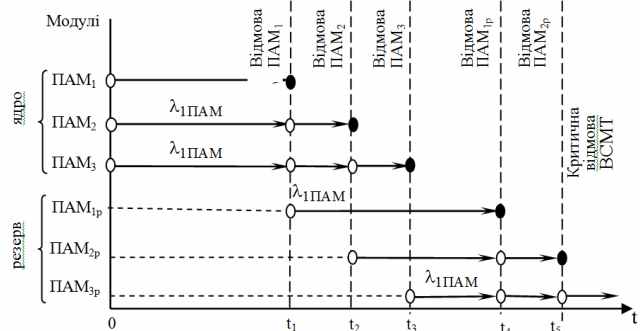


Рис. 2. Часова діаграма функціонування ВСМТ та трьома резервними ПАМ з відображенням моментів зміни (зростання) інтенсивності відмов модулів ядра (позначення: \circ – початок або продовження роботи ПАМ; \bullet – відмова ПАМ)

2) із станів, які мають в ядрі 3 модулі, з яких: 2 модулі залишилися після відмови першого і один новий модуль з резерву, інтенсивність переходів визначає інтенсивність відмов одного модуля, який перебуває на першому етапі старіння – $\lambda_{2ПАМ}$;

3) із станів, які мають в ядрі 3 модулі, з яких: 1 модуль залишився після відмови другого і два нових модулі з резерву, інтенсивність переходів визначає інтенсивність відмов одного модуля, який перебуває на другому етапі старіння – $\lambda_{3ПАМ}$;

4) із станів, які мають в ядрі 3 нові модулі підключені з резерву, інтенсивність переходів визначає початкове значення інтенсивності відмов одного модуля – $\lambda_{1ПАМ}$;

5) із станів, які мають в ядрі 2 модулі підключені з резерву, які залишилися після відмови першого, інтенсивність переходів визначає сумарна інтенсивність відмов двох модулів першого рівня старіння – $2\lambda_{2ПАМ}$.

5. Розроблення дискретно-неперервної стохастичної моделі досліджуваної відмовостійкої системи

Для розроблення дискретно-неперервної стохастичної моделі ВСМТ використано технологію моделювання подану в монографії [17] та удосконалену в статтях [18; 19; 20].

Згідно технології сформовано опорний граф станів та переходів досліджуваної ВСМТ на основі базових подій, що формують її надійнісну поведінку. Для цього задаємо параметри системи, визначаємо базові події, які враховували би всі процеси і процедури закладені в алгоритмі надійнісної поведінки ВСМТ, та призначаємо компоненти вектора станів системи.

В розробленій моделі ВСМТ враховані наступні її параметри та показники надійності і функціональності складових:

- n – початкова кількість справних ПАМ в ядрі ВСМТ;
- k – початкова кількість справних ПАМ ковзного резерву.

▪ $\lambda_{1ПAM}$ – середні значення інтенсивностей відмов ПAM, які експлуатуються з початку роботи ВСMT та ПAM ковзного резерву з моменту його включення в ядро ВСMT;

▪ $\lambda_{2ПAM}$ – середні значення інтенсивностей відмов другого та третього ПAM після відмови першого ПAM;

▪ $\lambda_{3ПAM}$ – середнє значення інтенсивності відмов третього ПAM після відмови другого ПAM;

▪ λ_{ME} – середнє значення інтенсивності відмови ME;

▪ $P_{у.к}$ – ймовірність успішного виконання процедури контролю і діагностики;

▪ $P_{у.п}$ – ймовірність успішного виконання процедури перемикання КП.

Для визначення базових подій сформована табл. 1, в якій відображені всі події надійнісної поведінки досліджуваної ВСMT.

Згідно технології моделювання [17] базовими подіями є всі події представлені в таблиці 1 в колонці ПОДІЯ – «закінчення». Підчас розроблення моделі прийнято до уваги, що:

1) чотири базові події, що представляють відмови різних ПAM, є фактично одною базовою подією «Відмова ПAM в ядрі». Для цієї базової події використано позначення БП1;

2) тривалість процедури контролю та діагностики і тривалість процедури відключення несправного ПAM та підключення резервного є значно меншими від середнього значення тривалості безвідмовної роботи ПAM і ME. Тому в розробленій моделі тривалості цих процедур є рівними нулю. Однак відповідні базові події цих процедур є зведеними з БП1 і мають позначення ЗвБП3 та ЗвБП4;

3) для базової події «Відмова ME» використано позначення БП2.

Вектор станів в розробленій моделі представлено такими компонентами:

V1 – відображає поточне значення кількості працюючих ПAM в ядрі, які експлуатуються з початку роботи ВСMT або підключені в ядро з резерву. Початкове значення компоненти: $V1 = 3$.

V2 – відображає поточне значення кількості працюючих ПAM у ядрі, які почали працювати після першої відмови модуля в ядрі (перший етап старіння модулів, що залишилися в ядрі). Початкове значення компоненти: $V2 = 0$.

V3 – відображає поточне значення кількості працюючих ПAM у ядрі, які почали працювати після другої відмови модуля в ядрі (другий етап старіння модулів, що залишилися в ядрі). Початкове значення компоненти: $V3 = 0$.

V4 – відображає поточне значення кількості працюючих ПAM в ковзному резерві. Початкове значення компоненти: $V4 = 3$.

V5 – відображає стан мажоритарного елемента: $V5 = 1$ – справний; $V5 = 0$ – несправний. Початкове значення компоненти: $V5 = 1$.

Розроблення опорного графа станів та переходів виконується за допомогою таблиці 2. Підчас розроблення опорного графа заносимо: в колонку 1 – номер кроку; в колонку 2 – номер стану, що розглядається, і актуальну базову подію; в колонку 3 – ймовірність альтернативного продовження процесу; в колонки 4, 5, 6, 7, 8 – значення компонент вектора стану; в колонку 9 – присвоєний номер стану; в колонку 10 – перехід з стану в стан, тобто номер попереднього стану, який береться з колонки 2, та номер наступного стану, в який здійснюється перехід (номер стану береться з колонки 9); в колонку 11 – формула для розрахунку значення інтенсивності переходу із стану в стан. Поточну кількість власних модулів ядра ВСMT в компонентах вектора стану позначено індексом «я», а кількість резервних модулів – індексом «р». Опорний граф станів розроблено для таких значень параметрів структури ВС: $n = 3, k = 3$.

Отриманий граф станів та переходів показує, що для досліджуваної в процесі експлуатації великої кількості відмовостійких систем будемо «бачити» 9 станів та 24 переходів. Причому 15 переходів є наслідком базових подій БП1, ЗвБП3, ЗвБП4 та 9 – базової події БП2.

На основі сформованого опорного графа станів визначено компоненти структурно-автоматної моделі за методикою поданою в працях [17, 19, 20].

Таблиця 1 – Події, що відображають поведінку досліджуваної відмовостійкої системи

№ з/п	ПОДІЯ – «початок» інтервалу часу між сусідніми подіями	ПОДІЯ – «закінчення» інтервалу часу між сусідніми подіями	Середнє значення інтервалу часу між подіями
1	Початок роботи ПAM ядра.	Відмова одного з ПAM ядра.	$t_{1ПAM} = 1/\lambda_{1ПAM}$
2	Початок роботи двох справних ПAM, що залишилися в ядрі після першої відмови.	Відмова другого ПAM ядра.	$t_{2ПAM} = 1/\lambda_{2ПAM}$
3	Початок роботи третього справного ПAM, що залишився в ядрі після відмови другого модуля.	Відмова третього ПAM ядра.	$t_{3ПAM} = 1/\lambda_{3ПAM}$
4	Початок роботи першого резервного ПAM, підключеного замість несправного ПAM в ядро.	Відмова підключеного в ядро резервного ПAM.	$t_{1ПAM} = 1/\lambda_{1ПAM}$
5	Початок роботи ME.	Відмова ME.	$t_{ME} = 1/\lambda_{ME}$
6	Початок процедури контролю та діагностики	Закінчення процедури контролю і діагностики	$t_{к.д}$
7	Початок процедури відключення несправного ПAM і підключення резервного.	Закінчення процедури відключення несправного ПAM і підключення резервного.	$t_{ком}$

Таблиця 2 – Розроблення опорного графа станів і переходів ВСМТ з трьома резервними ПАМ та із зростанням інтенсивності відмов модулів в процесі експлуатації

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна база подія	Ймовірність альтернативного продовження процесу	Вектор стану					№ стану	Перехід з стану в стан	Формула розрахунку значення інтенсивності переходу із стану в стан
			Ядро			Резерв	Стан МЕ			
			V1	V2	V3	V4	V5			
Початковий стан			3я	0	0	3	1	1	--	-
1	1БП1	$P_{y.k}P_{y.n}$	1р	2я	0	2	1	2	1 → 2	$\lambda_{1ПАМ}P_{y.k}P_{y.n}$
2	(ЗвБП3 ЗвБП4)	$1 - P_{y.k}P_{y.n}$	0	2я	0	3	1	3	1 → 3	$\lambda_{1ПАМ}(1 - P_{y.k}P_{y.n})$
3	1БП2	-	3я	0	0	3	0	КВ	1 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
4	2БП1	$P_{y.k}P_{y.n}$	2р	0	1я	1	1	4	2 → 4	$\lambda_{2ПАМ}P_{y.k}P_{y.n}$
5	(ЗвБП3 ЗвБП4)	$1 - P_{y.k}P_{y.n}$	1р	0	1я	2	1	5	2 → 5	$\lambda_{2ПАМ}(1 - P_{y.k}P_{y.n})$
6	2БП2	-	1р	2я	0	2	0	КВ	2 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
7	3БП1	$P_{y.k}P_{y.n}$	1р	0	1я	2	1	5	3 → 5	$\lambda_{2ПАМ}P_{y.k}P_{y.n}$
8	(ЗвБП3, ЗвБП4)	$1 - P_{y.k}P_{y.n}$	0	0	1я	3	1	КВ	3 → КВ	$\lambda_{2ПАМ}(1 - P_{y.k}P_{y.n})$
9	3БП2	-	0	2я	0	3	0	КВ	3 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
10	4БП1	$P_{y.k}P_{y.n}$	3р	0	0	0	1	6	4 → 6	$\lambda_{3ПАМ}P_{y.k}P_{y.n}$
11	(ЗвБП1, ЗвБП4)	$1 - P_{y.k}P_{y.n}$	2р	0	0	1	1	7	4 → 7	$\lambda_{3ПАМ}(1 - P_{y.k}P_{y.n})$
12	4БП2	-	2р	0	1я	1	0	КВ	4 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
13	5БП1 (ЗвБП3, ЗвБП4)	$P_{y.k}P_{y.n}$	2р	0	0	1	1	7	5 → 7	$\lambda_{3ПАМ}P_{y.k}P_{y.n}$
14		$1 - P_{y.k}P_{y.n}$	1р	0	0	2	1	КВ	5 → КВ	$\lambda_{3ПАМ}(1 - P_{y.k}P_{y.n})$
15	5БП2	-	1р	0	1я	2	0	КВ	5 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
16	6БП1	-	0	2р	0	0	1	8	6 → 8	$\lambda_{1ПАМ}$
17	6БП2	-	3р	0	0	0	0	КВ	6 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
18	7БП1 (ЗвБП3 ЗвБП4)	$P_{y.k}P_{y.n}$	1р	1р	0	0	1	9	7 → 9	$\lambda_{1ПАМ}P_{y.k}P_{y.n}$
19		$1 - P_{y.k}P_{y.n}$	0	1р	0	1	1	КВ	7 → КВ	$\lambda_{1ПАМ}(1 - P_{y.k}P_{y.n})$
20	7БП2	-	2р	0	0	1	0	КВ	7 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
21	8БП1	-	0	0	1р	0	1	КВ	8 → КВ	$\lambda_{2ПАМ}$
22	8БП2	-	0	2р	0	0	0	КВ	8 → КВ	$\lambda_{МЕ}$
23	9БП1	-	1р	0	0	0	1	КВ	9 → КВ	$\lambda_{2ПАМ}$
24	9БП2	-	1р	1р	0	0	0	КВ	9 → КВ	$\lambda_{МЕ}$

Так як модель має 2 базові події, то задача формування структурно-автоматної моделі вирішується в два етапи. На першому етапі виберемо з опорного графа всі стани, що формуються після базової події БП1 і зведеними з нею подіями ЗвБП3, ЗвБП4 (табл. 3). На другому етапі вибираємо з графа всі стани, що формуються після базової події БП2 (табл. 4). Зауважимо, що за результатами розроблення опорного графа станів до структурно-автоматної моделі переходять такі компоненти: базові події, вектор станів та формули розрахунку інтенсивностей переходів із стану в стан.

На підставі сформованих табл. 3 та 4 визначимо ще дві компоненти структурно-автоматної моделі для базової події БП1 і зведених з нею подій ЗвБП3, ЗвБП4 та базової події БП2, а саме:

– складаємо логічні вирази опису ситуацій, в яких відбуваються базові події;

– формуємо правило модифікації компонент вектора стану для кожного переходу із стану в стан, тобто визначаємо, які компоненти вектора стану змінюватимуться при переходах із стану в стан.

Визначені компоненти структурно-автоматної моделі заносимо в табл. 5, форма якої відповідає формі діалогового вікна програмного засобу ASNA [21].

Програмний засіб ASNA на основі введеної структурно-автоматної моделі здійснює:

побудову графа станів для будь-яких значень параметрів і показників надійності та функціональності складових ВСМТ;

формування та розв'язання відповідної системи диференціальних рівнянь;

розрахунок значень показників надійності, а саме ймовірність безвідмовної роботи ВСМТ на заданому інтервалі експлуатації та середнє значення тривалості її безвідмовної роботи.

Таблиця 3 – Визначення ситуацій, в яких відбуваються базова подія БП1 і зведені з нею події ЗвБПЗ, ЗвБП4

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна базова подія	Ймовірність альтернативного продовження процесу	Вектор стану					№ стану	Перехід з стану в стан	Формула розрахунку значення інтенсивності переходу із стану в стан	
			Ядро				Резерв				Стан МЕ
			V1	V2	V3	V4					
1-а ситуація			3я	0	0	3	1	1		-	
1	1БП1	$P_{у.к}P_{у.л}$	1р	2я	0	2	1	2	1 → 2	$\lambda_{1ПAM}P_{у.к}P_{у.л}$	
2	(ЗБПЗ, ЗБП4)	$1 - P_{у.к}P_{у.л}$	0	2я	0	3	1	3	1 → 3	$\lambda_{1ПAM}(1 - P_{у.к}P_{у.л})$	
2-а ситуація			1р	2я	0	2	1	2			
4	2БП1	$P_{у.к}P_{у.л}$	2р	0	1я	1	1	4	2 → 4	$\lambda_{2ПAM}P_{у.к}P_{у.л}$	
5	(ЗБПЗ, ЗБП4)	$1 - P_{у.к}P_{у.л}$	1р	0	1я	2	1	5	2 → 5	$\lambda_{2ПAM}(1 - P_{у.к}P_{у.л})$	
3-а ситуація			0	2я	0	3	1	3			
7	3БП1	$P_{у.к}P_{у.л}$	1р	0	1я	2	1	5	3 → 5	$\lambda_{2ПAM}P_{у.к}P_{у.л}$	
8	(ЗБПЗ, ЗБП4)	$1 - P_{у.к}P_{у.л}$	0	0	1я	3	1	КВ	3 → КВ	$\lambda_{2ПAM}(1 - P_{у.к}P_{у.л})$	
4-а ситуація			2р	0	1я	1	1	4			
10	3БП1	$P_{у.к}P_{у.л}$	3р	0	0	0	1	6	4 → 6	$\lambda_{3ПAM}P_{у.к}P_{у.л}$	
11	(ЗБПЗ, ЗБП4)	$1 - P_{у.к}P_{у.л}$	2р	0	0	1	1	7	4 → 7	$\lambda_{3ПAM}(1 - P_{у.к}P_{у.л})$	
5-а ситуація			1р	0	1я	2	1	5			
13	5БП1	$P_{у.к}P_{у.л}$	2р	0	0	1	1	7	5 → 7	$\lambda_{3ПAM}P_{у.к}P_{у.л}$	
14	(ЗБПЗ, ЗБП4)	$1 - P_{у.к}P_{у.л}$	1р	0	0	2	1	КВ	5 → КВ	$\lambda_{3ПAM}(1 - P_{у.к}P_{у.л})$	
6-а ситуація			3р	0	0	0	1	6			
16	6БП1	-	0	2р	0	0	1	8	6 → 8	$\lambda_{1ПAM}$	
7-а ситуація			2р	0	0	1	1	7			
18	7БП1	$P_{у.к}P_{у.л}$	1р	1р	0	0	1	9	7 → 9	$\lambda_{1ПAM}P_{у.к}P_{у.л}$	
19	(ЗБПЗ, ЗБП4)	$1 - P_{у.к}P_{у.л}$	0	1р	0	1	1	КВ	7 → КВ	$\lambda_{1ПAM}(1 - P_{у.к}P_{у.л})$	
8-а ситуація			0	2р	0	0	1	8			
21	8БП1	-	0	0	1р	0	1	КВ	8 → КВ	$\lambda_{2ПAM}$	
9-а ситуація			1р	1р	0	0	1	9			
23	9БП1	-	1р	0	0	0	1	КВ	9 → КВ	$\lambda_{2ПAM}$	

Таблиця 4 – Визначення ситуацій, в яких відбувається базова подія БП2

№ кроку	Стан, що розглядається, і актуальна базова подія	Ймовірність альтернативного продовження процесу	Вектор стану					№ стану	Перехід з стану в стан	Формула розрахунку значення інтенсивності переходу із стану в стан	
			Ядро				Резерв				Стан МЕ
			V1	V2	V3	V4					
1-а ситуація			3я	0	0	3	1	1		-	
1	1БП2	-	3я	0	0	3	0	КВ	1 → КВ	λ_{ME}	
2-а ситуація			1р	2я	0	2	1				
2	2БП2	-	1р	2я	0	2	0	КВ	2 → КВ	λ_{ME}	
3-а ситуація			0	2я	0	3	1				
3	3БП2	-	0	2я	0	3	0	КВ	3 → КВ	λ_{ME}	
4-а ситуація			2р	0	1я	1	1				
4	4БП2	-	2р	0	1я	1	0	КВ	4 → КВ	λ_{ME}	
5-а ситуація			1р	0	1я	2	1				
5	5БП2	-	1р	0	1я	2	0	КВ	5 → КВ	λ_{ME}	
6-а ситуація			3р	0	0	0	1				
6	6БП2	-	3р	0	0	0	0	КВ	6 → КВ	λ_{ME}	
7-а ситуація			2р	0	0	1	1				
7	7БП2	-	2р	0	0	1	0	КВ	7 → КВ	λ_{ME}	
8-а ситуація			0	2р	0	0	1				
8	8БП2	-	0	2р	0	0	0	КВ	8 → КВ	λ_{ME}	
9-а ситуація			1р	1р	0	0	1				
9	9БП2	-	1р	1р	0	0	0	КВ	9 → КВ	λ_{ME}	

Таблиця 5 – Структурно-автоматна модель запропонованої ВСМТ

№ ситуації	Логічні вирази опису ситуацій, в яких відбувається базова подія	Формули розрахунку інтенсивності переходу	Правила модифікації компонент вектора стану
Базова подія БП1 та зведені з нею події ЗБП3, ЗБП4			
1	(V1=3) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=3) AND (V5=1)	$\lambda_{1ПІАМ} P_{y,k} P_{y,n}$	V1:=1; V2:=2; V4:=2
		$\lambda_{1ПІАМ} (1 - P_{y,k} P_{y,n})$	V1:=0; V2:=2
2	(V1=1) AND (V2=2) AND (V3=0) AND (V4=2) AND (V5=1)	$\lambda_{2ПІАМ} P_{y,k} P_{y,n}$	V1:=2; V2:=0; V3:=1; V4:=1
		$\lambda_{2ПІАМ} (1 - P_{y,k} P_{y,n})$	V2:=0; V3:=1
3	(V1=0) AND (V2=2) AND (V3=0) AND (V4=3) AND (V5=1)	$\lambda_{2ПІАМ} P_{y,k} P_{y,n}$	V1:=1; V2:=0; V3:=1; V4:=2
		$\lambda_{2ПІАМ} (1 - P_{y,k} P_{y,n})$	V2:=0; V3:=1
4	(V1=2) AND (V2=0) AND (V3=1) AND (V4=1) AND (V5=1)	$\lambda_{3ПІАМ} P_{y,k} P_{y,n}$	V1:=3; V3:=0; V4:=0
		$\lambda_{3ПІАМ} (1 - P_{y,k} P_{y,n})$	V3:=0
5	(V1=1) AND (V2=0) AND (V3=1) AND (V4=2) AND (V5=1)	$\lambda_{3ПІАМ} P_{y,k} P_{y,n}$	V1:=2; V3:=0; V4:=1
		$\lambda_{3ПІАМ} (1 - P_{y,k} P_{y,n})$	V3:=0
6	(V1=3) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=1)	$\lambda_{1ПІАМ}$	V1:=0; V2:=2
7	(V1=2) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=1) AND (V5=1)	$\lambda_{1ПІАМ} P_{y,k} P_{y,n}$	V1:=1; V2:=1; V4:=0
		$\lambda_{1ПІАМ} (1 - P_{y,k} P_{y,n})$	V1:=0; V2:=1
8	(V1=0) AND (V2=2) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=1)	$\lambda_{2ПІАМ}$	V2:=0; V3:=1
9	(V1=1) AND (V2=1) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=1)	$\lambda_{2ПІАМ}$	V2:=0
Базова подія БП2			
1	(V1=3) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=3) AND (V5=1)	λ_{ME}	V5:=0
2	(V1=1) AND (V2=2) AND (V3=0) AND (V4=2) AND (V5=1)	λ_{ME}	V5:=0
3	(V1=0) AND (V2=2) AND (V3=0) AND (V4=3) AND (V5=1)	λ_{ME}	V5:=0
4	(V1=2) AND (V2=0) AND (V3=1) AND (V4=1) AND (V5=1)	λ_{ME}	V5:=0
5	(V1=1) AND (V2=0) AND (V3=1) AND (V4=2) AND (V5=1)	λ_{ME}	V5:=0
6	(V1=3) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=1)	λ_{ME}	V5:=0
7	(V1=2) AND (V2=0) AND (V3=0) AND (V4=1) AND (V5=1)	λ_{ME}	V5:=0
8	(V1=0) AND (V2=2) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=1)	λ_{ME}	V5:=0
9	(V1=1) AND (V2=1) AND (V3=0) AND (V4=0) AND (V5=1)	λ_{ME}	V5:=0

6. Аналіз надійності відмовостійкої системи мажоритарного типу з урахуванням старіння модулів ядра в процесі експлуатації

Процес старіння модулів в ядрі ВСМТ типу відображає залежність середнього значення інтенсивності відмов модулів від тривалості експлуатації. Характерна особливість цієї залежності в тому, що на великому інтервалі часу інтенсивність відмов модулів є низькою і постійною. Але після деякої тривалості експлуатації інтенсивність відмов починає зростати. Крутизна цього зростання може бути різною. І є цілком логічним інтерпретувати різні крутизни зростання як різні «швидкості старіння модулів ядра».

Розроблена для проведення дослідження модель дає змогу відтворювати будь-яку крутизну зростання інтенсивності відмов модулів ядра ВСМТ, тобто різні швидкості їх старіння.

Крутизна зростання інтенсивності формується вибором співвідношенням між значеннями інтенсивності відмов $\lambda_{1ПІАМ}$, $\lambda_{2ПІАМ}$, $\lambda_{3ПІАМ}$.

Так, наприклад, співвідношеннями

$$\lambda_{3ПІАМ} / \lambda_{2ПІАМ} = \lambda_{2ПІАМ} / \lambda_{1ПІАМ} = 5$$

можна представляти низьку (малу) швидкість старіння модулів ядра, а співвідношеннями

$$\lambda_{3ПІАМ} / \lambda_{2ПІАМ} = \lambda_{2ПІАМ} / \lambda_{1ПІАМ} = 100 -$$

високу швидкість їх старіння.

Аналіз надійності ВСМТ проведено при таких вхідних даних:

початкова кількість модулів в ядрі – $n = 3$;

початкова кількість модулів ковшного резерву – k ;

$$\lambda_{1ПІАМ} = 10^{-4} 1/200; \lambda_{2ПІАМ} = (5...100)\lambda_{1ПІАМ} 1/200;$$

$$\lambda_{3ПІАМ} = (5...100)\lambda_{2ПІАМ} 1/200;$$

$$\lambda_{ME} = 5 \cdot 10^{-4} 1/200; P_{y,k} = 0,99; P_{y,n} = 0,99.$$

Результати дослідження надійності ВСМТ для різних співвідношень між $\lambda_{1ПІАМ}$, $\lambda_{2ПІАМ}$ та $\lambda_{3ПІАМ}$ приведено в табл. 6 та на рис. 3.

Таблиця 6 – Залежність середнього значення тривалості безвідмовної роботи ВСМТ від швидкості старіння модулів ядра при різних кількостях резервних модулів

Кількість резервних модулів, k	Середні значення тривалостей безвідмовної роботи ВСМТ для різних значень співвідношення інтенсивностей відмов модулів ядра: 1, 5, 10, 50, 100 ($\lambda_{1ПММ} = 10^{-4} 1/год$)				
	1	5	10	50	100
0	15113	11082	10532	10105	10054
1	25054	12383	11093	10206	10104
2	34873	17202	16084	15196	15094
3	44599	23116	21133	20008	19854
4	54239	24677	22146	20380	20177
5	63076	29137	26588	24814	24609
6	73130	35152	32082	29888	29629

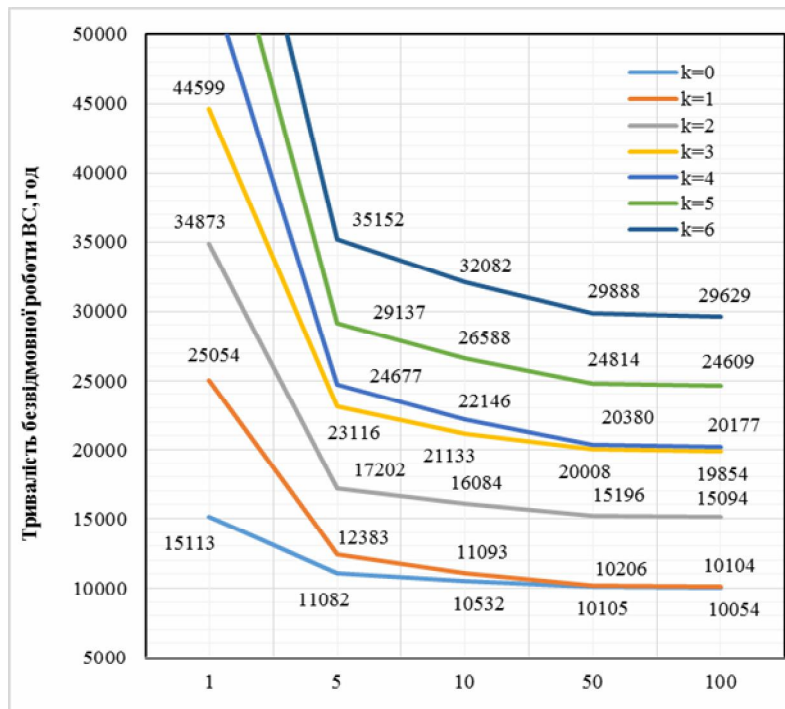


Рис. 3. Залежність тривалості безвідмовної роботи ВСМТ від співвідношення середніх значень інтенсивності відмов модулів ядра $\lambda_{3ПММ} / \lambda_{2ПММ} = \lambda_{2ПММ} / \lambda_{1ПММ}$ з різною кількістю резервних модулів

Для порівняння значень подано результат розрахунку середнього значення тривалості безвідмовної роботи ВСМТ при незмінних значеннях інтенсивності відмов ПАМ, які дають відомі моделі.

Як показали проведені дослідження (рис. 3) у ВСМТ і трьома модулями в ядрі не доцільно мати (включати) 1 або 4 резервних модулів. Треба включати 2, 3, 5, 6 резервних модулів, в залежності від того, яке значення тривалості безвідмовної роботи необхідно забезпечити (гарантувати). Крім того, при великих швидкостях старіння модулів

$$\lambda_{3ПММ} / \lambda_{2ПММ} = \lambda_{2ПММ} / \lambda_{1ПММ} \geq 50,$$

середні значення тривалості безвідмовної роботи є практично однаковими.

Висновки

Отримані результати моделювання відмовостійкої системи мажоритарного типу (ВСМТ) з правилом голосування {2 із 3} і з резервними програмно-апаратними модулями (ПАМ) в кількості від 1 до 6 з використанням розробленої надійнісної моделі

підтверджують гіпотезу про те, що показники надійності ВСМТ, а саме середнє значення тривалості безвідмовної роботи та ймовірність безвідмовної роботи за час експлуатації, мають менші значення ніж при моделюванні ВСМТ з незмінними значеннями інтенсивності відмов ПАМ. При цьому, чим більшим є приріст значень інтенсивності відмов модулів ядра внаслідок вичерпання ними експлуатаційного ресурсу в процесі експлуатації, тим меншими є значення показників надійності ВСМТ. Слід відзначити тенденцію, що із збільшенням приросту значень інтенсивностей відмов ПАМ зменшення значень показників надійності стає повільнішим.

Враховання зростання інтенсивності відмов модулів ядра в процесі їх експлуатації підвищує ступінь адекватності надійнісних моделей ВСМТ і є важливим для практики розв'язання задач надійнісного синтезу відмовостійких систем мажоритарного типу.

Запропонований підхід до розроблення надійнісної моделі ВСМТ з правилом голосування {2 із 3} можна поширити до інших відмовостійких систем, наприклад з правилом голосування {3 із 5}.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mathematical Models and Methods for Reliability Analysis of Radio, Electronic and Software Systems / Bobalo Yu.Ya., Volochiy B.Yu., Lozinsky O.Yu., Mandziy B.A., Ozirkovsky L.D., Fedasyuk D.V., Scherbovskikh S.V., Yakovyna V.S., – Lviv: Polytechnic National University, 2013. – 300 p. (in Ukrainian).
2. Biernat Janusz The Effect of Compensating Faults Models on NMR System Reliability / Biernat Janusz // IEEE Transactions on reliability. – 1994. – vol. 43, No. 2. – P. 294-300.
3. Sherif Yacoub Automating the Analysis of Voting Systems / Sherif Yacoub, Xiaofan Lin, Steve Simske, John Burns // Software Reliability Engineering. ISSRE. – 2003. – P. 203-214.
4. Ingle Ashok A Reliability Model for Various Switch Designs in Hybrid Redundancy/ Ashok Ingle, Daniel Siewiorek. – Carnegie Mellon University. – 1973. – 43 p.
5. MIL-HDBK-202: Test Methods for Electronic and Electrical Component Parts.
6. MIL-HDBK-217F: Reliability Prediction for Electronic Equipment.
7. Methodology for Ageing Management of Nuclear Power Plant Component Important to Safety. IAEA-TRS-338 / IAEA Vienna, 1992. – 62 p.
8. Evaluating the Effects of Aging on Electronic Instrument and Control Circuit Boards and Components in Nuclear Power Plants <https://www.osti.gov/servlets/purl/841248>.
9. Харченко В. С. Модели надежности информационно-управляющих систем с сетевым многоярусным мостиковым мажоритированием / В. С. Харченко, В. В. Скляр, А. Д. Герасименко // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 6. – С. 196-201. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/recs_2007_6_38.
10. David J. Smith Reliability, Maintainability and Risk (Ninth Edition) Practical Methods for Engineers / David J. Smith / Published Elsevier Butterworth-Heinemann. – 2017. – 478 p.
11. Харченко В.С., Пискачова И.В. Метод многоверсионного мажоритарного резервирования цифровых управляющих вычислительных систем и исследование их с использованием имитационного моделирования // Системи обробки інформації. 2003, №5. – С. 120-125.
12. Koren Israel Fault tolerant systems / Israel Koren, C. Mani Krishna // Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier, 2007. – 378 p.
13. Dubrova E. Fault tolerant design: an introduction / Dubrova E. – Department of Microelectronics and Information Technology Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden. Kluwer Academic Publishers, 2007. – 150 p.
14. Balasubramanian P. System Reliability, Fault Tolerance and Design Metrics Tradeoffs in the Distributed Minority and Majority Voting Based Redundancy Scheme // WSEAS transactions on systems. – 2016, volume 16. – P. 59-62.
15. 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.
16. Volochiy B. The Reliability Model of Fault-Tolerant System with the Majority Structure and Considering the Change in the Failure Rate of the Core Module During Operation / B. Volochiy, V. Yakubenko, M. Zmysnyi // Proceedings of 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020), Lviv-Slavske, Ukraine, February 25-29, 2020. Paper ID 211.
17. Volochiy B.Y. Technology of modeling algorithms of information systems behavior / B.Y. Volochiy – Lviv, NU “Lviv Politechnika”, 2004 – 220 p.
18. Fedasiuk D.V. Methods of developing structural automaton models for discrete-continuous stochastic systems / D.V. Fedasiuk, S.B. Volochiy // Scientific journal “Radioelectronic and computer systems” – Kharkiv, «KhAI» 2016. – №6(80). – P. 24-34.
19. Fedasyuk, D. Method of Developing the Structural-Automaton Models of Fault-Tolerant Systems [Text] / Dmytro Fedasyuk, 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.
20. Федасюк Д. В. Методика розроблення структурно-автоматних моделей відмовостійких систем з альтернативними продовженнями випадкових процесів після процедур контролю, перемикання і відновлення / Д. В. Федасюк, С. Б. Волочій // Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». – Львів: вид-во Львівської політехніки. – 2017. – № 864. – С. 49-62.
21. Волочій Б.Ю. Системотехнічне проектування телекомунікаційних мереж. Практикум / Б.Ю. Волочій, Л.Д. Озірковський. – Львів: Вид-во Національного університету “Львівська політехніка”, 2012. – 128 с.

Received (Надійшла) 07.12.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 20.01.2021

Researching the influence of core modules aging of a fault-tolerant majoritarian system on the its reliability indicators value

Bohdan Volochiy, Vasyl Yakubenko, Yurii Salnyk, Mykhailo Zmysnyi

Abstract. The article proposes a reliability model of a fault-tolerant majoritarian system with the {2 of 3} voting rule. In this model the effect of aging of both: the first set of core modules and reserve modules, which are included in the core during operation, is taken into account in an original way. Also, the traditional "false" determination of core failure rate of the majoritarian structure has been corrected. Consideration of the listed features in the model provides significant improvement of veracity the reliability indicators of such a system. The high level of adequacy of the reliability model makes it usable for solving problems of reliability synthesis of fault-tolerant majority-type systems. For example, to define the needed (minimum) number of redundant modules for a specified duration of operation of a fault-tolerant majoritarian type system without maintenance.

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