

УДК 621.396.6.019.3+519.87

Мандзій Б. А.¹, Волочій Б. Ю.², Озірковський Л. Д.³, Змисний М. М.⁴, Муляк О. В.⁵

^{1,2} Д-р техн. наук, професор, Національного університету «Львівська політехніка»

³ Канд. техн. наук, доцент Національного університету «Львівська політехніка»

^{4,5} Аспірант Національного університету «Львівська політехніка»

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТРЬОХ КОНФІГУРАЦІЙ ВІДМОВОСТІЙКОЇ СИСТЕМИ З МАЖОРИТАРНОЮ СТРУКТУРОЮ

В статті здійснено порівняння надійності, яку можуть забезпечувати відмовостійкі системи з мажоритарною структурою, а саме: три мажоритарні структури вкладені в мажоритарну структуру, мажоритарна структура з реконфігурацією ядра та мажоритарна структура з фіксованим правилом прийняття рішення. Розробка моделей відмовостійких систем здійснена за допомогою технології аналітичного моделювання з представленням їх у вигляді дискретно-неперервної стохастичної системи.

Ключові слова: надійність, відмовостійка система, мажоритарна структура.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

При проектуванні програмно-апаратних радіоелектронних засобів (РЕЗ) відповідального призначення важливою задачею є вибір відмовостійкої системи (ВС), яка б забезпечила необхідний рівень її надійності протягом всього етапу експлуатації.

Надійність програмно-апаратних РЕЗ підвищують шляхом використання ВС на основі мажоритарної структури (МС) з фіксованим правилом прийняття рішення [1; 3–5]. Така ВС використана в системі аварійного захи-

сту на атомних електростанціях [3], в системі керування подачі палива в літаку Boeing [4], в системах централізованого контролю об'єктів метрополітену або промислових підприємств [5]. В бортовій керуючій обчислювальній системі [7] використана ВС з реконфігурацією ядра мажоритарної структури. В системах логічного управління використовують ВС з вкладенням кількох мажоритарних структур в мажоритарну структуру [1, с. 156; 8, с. 51], яку автори цих монографій називають «ВС з паралельно-гібридним резервуванням».

Як показав проведений огляд публікацій, в сучасних програмно-апаратних РЕЗ відповідального призначення використовуються: ВС на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом прийняття рішення; ВС з реконфігурацією ядра мажоритарної структури; ВС з вкладенням кількох мажоритарних структур в мажоритарну структуру. Однак, у відомих нам публікаціях не приведено моделей для оцінки надійності, що в свою чергу не дозволяє провести порівняльний аналіз надійності з представленими вище варіантами реалізації ВС з мажоритарною структурою.

Отже, актуальною є задача порівняння надійності програмно-апаратних РЕЗ при використанні ВС з мажоритарною структурою.

1. КОНФІГУРАЦІЯ ВІДМОВСТІЙКИХ СИСТЕМ З МАЖОРИТАРНОЮ СТРУКТУРОЮ

Для розв'язання такої задачі, для кожної конфігурації ВС з мажоритарною структурою розроблено надійнісні моделі. Розробка моделей здійснена за технологією аналітичного моделювання, поданою в [9]. До складу ВС, структурна схема якої показана на рис. 1, входять: ядро відмовостійкої системи (ВС), яке складається з n технічних систем (ТС); m резервних ТС (холодний резерв); детектор розузгодження (ДР); мажоритарний елемент (МЕ); комутаційний пристрій (КП); ремонтна служба (РС).

В моделі цієї ВС враховано: наявність ковзного резерву для ТС ядра; технічне обслуговування з стратегією аварійного відновлення; обмеження на кількість відновлень (кількість ремонтів регламентується кількістю запасних частин на складі); ненадійну роботу комутатора ковзного резерву. Тривалість безвідмовної роботи ТС представлена експоненційним законом розподілу, а тривалість їх відновлення – законом розподілу Ерланга. Модель такої системи описана в статті [2].

До складу ВС з реконфігурацією ядра мажоритарної структури, структурна схема якої представлена на рис. 2,

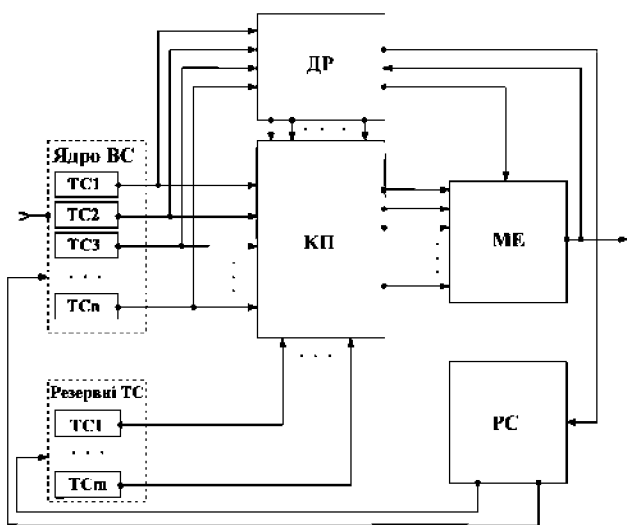


Рис. 1. Структурна схема відмовостійкої системи на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом прийняття рішення

входять: ядро МС, яке складають ТС робочої конфігурації; ТС ковзного резерву; адаптивний мажоритарний елемент (АМЕ); детектор розузгодження (ДР); комутаційний пристрій (КП). В розробленій моделі враховано: зміну правила прийняття рішення і відповідну реконфігурацію ядра мажоритарної структури, що дозволяє зберегти мажоритарний принцип при зменшенні кількості працездатних ТС ядра; наявність ковзного резервування ТС ядра; ненадійну роботу мажоритарного елемента та комутатора ковзного резерву. Модель такої системи представлено в статті [6].

Для ВС, в конфігурацію якої включено три мажоритарні структури, вкладені в мажоритарну структуру і структурна схема якої представлена на рис. 3, розроблено дві моделі [10]. До її складу входить: три ядра, які мають по 3 технічні системи; резервні ТС, що з'являються в процесі втрати працездатності одного із ядер або двох ТС в ядрі; детектор розузгодження для виявлення несправних ТС (ДР₁); детектор розузгодження для виявлення несправних ядер (ДР₂); мажоритарні елементи для 1-го, 2-го, 3-го ядра (МЕ₁, МЕ₂, МЕ₃); кінцевий мажоритарний елемент (КМЕ); комутаційний пристрій (КП).

Розроблені моделі для даної ВС відрізняються тим, що граничну працездатність ВС визначають два правила: перше правило визначає збереження працездатності ВС, коли залишились справними 2 ядра з 3; друге правило визначає збереження працездатності ВС, коли залишилось справним 1 ядро з 3. В моделях враховано можливість формування ковзного резерву із «зайвих» ТС та ненадійну роботу ТС і мажоритарних елементів ядер. В розроблених моделях прийнято, що надійність детекторів розузгодження (ДР₁, ДР₂), комутаційного пристрою та кінцевого мажоритарного елемента є значно вищою від інших складових ВС і мають тривалість безвідмовної роботи більшу ніж тривалість експлуатації РЕЗ. Тому в моделях їх відмови не враховуються.

В табл. 1 представлені розмірності моделей ВС у вигляді графа станів і переходів, для всіх досліджуваних конфігурацій.

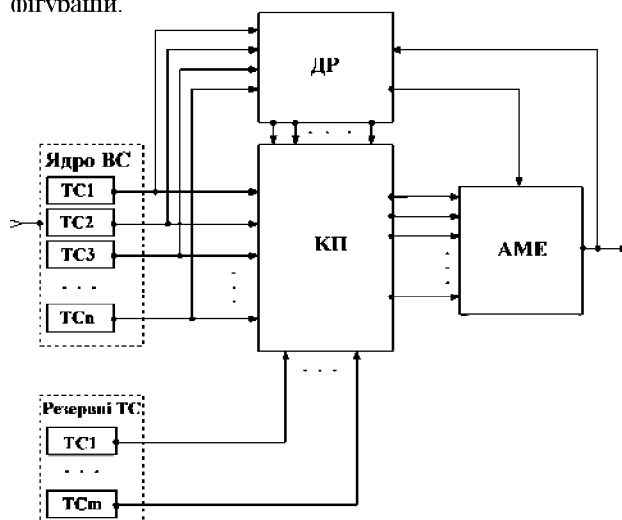


Рис. 2. Структурна схема відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра мажоритарної структури

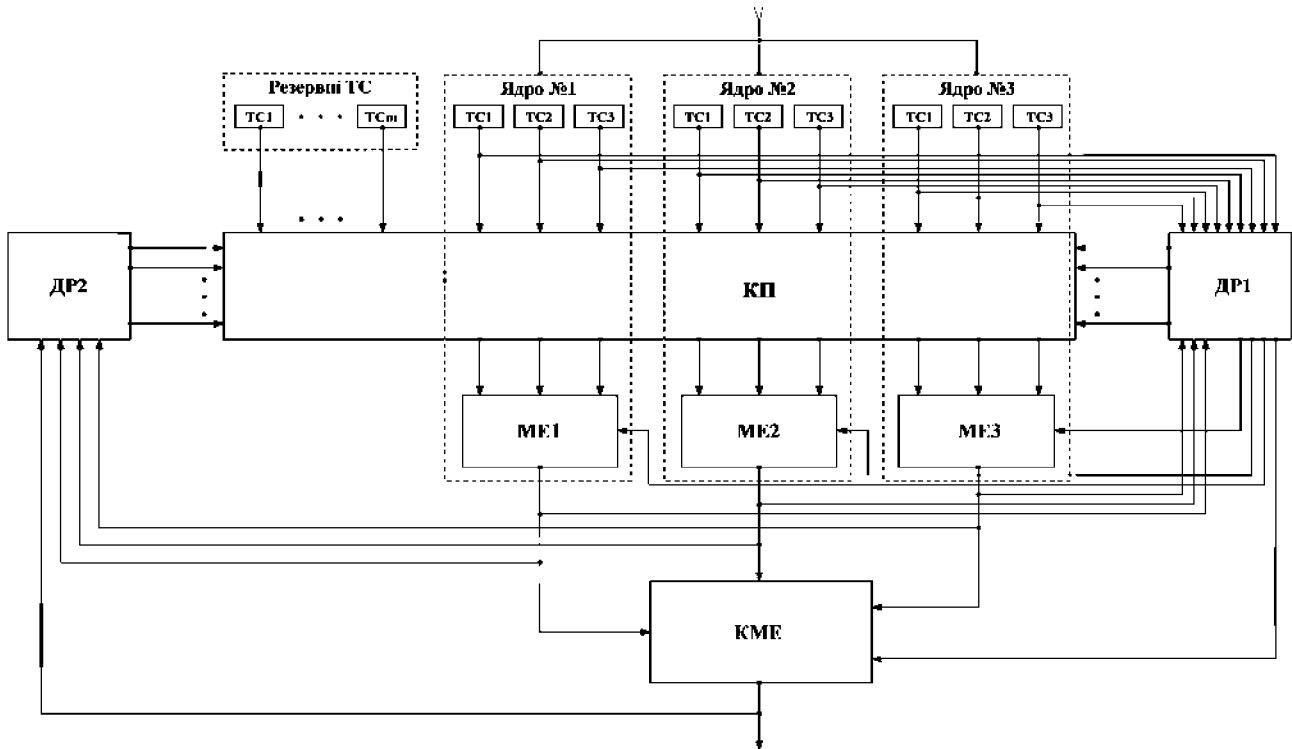


Рис. 3. Структурна схема відмовостійкої системи з використанням трьох мажоритарних структур вкладених в мажоритарну структуру

Таблиця 1. Розмірності графа для досліджуваних ВС з мажоритарною структурою

Конфігурація відмовостійкої системи		Розмірність графа	
		Кількість станів	Кількість переходів
ВС на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом прийняття рішення	1) МС з фіксованим правилом прийняття рішення типу «5 з 9»	9	18
	2) МС з фіксованим правилом прийняття рішення типу «4 з 7» (2 ТС в резерві)	28	68
	3) МС з фіксованим правилом прийняття рішення типу «3 з 5» (4 ТС в резерві)	40	101
	4) МС з фіксованим правилом прийняття рішення типу «2 з 3» (6 ТС в резерві)	36	94
ВС з реконфігурацією ядра мажоритарної структури	5) МС з реконфігурацією ядра типу «5 з 9»	61	152
	6) МС з реконфігурацією типу «4 з 7» (2 ТС в резерві)	82	215
	7) МС з реконфігурацією типу «3 з 5» (4 ТС в резерві)	70	187
ВС з використанням трьох мажоритарних структур вкладених в мажоритарну структуру	8) МС в МС з правилом збереження працездатності до наявності 2 ядер з 3	80	308
	9) МС в МС з правилом збереження працездатності до наявності 1 ядра з 3	200	794

2. ПОРІВНЯННЯ НАДІЙНОСТІ ВІДМОВОСТІЙКИХ СИСТЕМ

Задача № 1. Необхідно прийняти рішення, якій ВС (ВС з використанням трьох мажоритарних структур, вкладених в мажоритарну структуру, чи ВС на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом прийняття рішення) слід віддати перевагу, при конкретних умовах реалізації, заданих вхідними параметрами. Технічна система, на основі якої формується відмовостійка система, має такі параметри: інтенсивність відмов в робочому стані $\lambda_n = 0,001$ 1/год.; інтенсивність відмов, якщо система перебуває в «холодному» резерві $\lambda_m = 0,0001$ 1/год.; тривалість завантаження програмного забезпечення $T = 0,1$ год. Інтервали часу, які необхідні на підключення ТС з «холодного» резерву в «гарячий», для ВС на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом прийняття рішення, та підключення ТС з «холодного» резерву в ядро, для ВС з використанням трьох мажоритарних структур, вкладених в мажоритарну структуру, визначають тривалість завантаження програмного забезпечення. Інтенсивність відмов мажоритарного елемента $\lambda_{me} = 0,0001$ 1/год. Результати досліджень і показники надійності відображені на рис. 4 і в табл. 2.

При порівнянні розглядаються наступні варіанти ВС: 1 – ВС з використанням трьох МС, вкладених в МС і правилом збереження працездатності до наявності 2 ядер з 3; 2 – ВС на основі МС з фіксованим правилом прийняття рішення «5 з 9»; 3 – ВС на основі МС з фіксованим правилом прийняття рішення «4 з 7» (2 ТС в резерві); 4 – ВС на основі МС з фіксованим правилом прийняття рішення типу «3 з 5» (4 ТС в резерві); 5 – ВС на основі МС з фіксованим правилом прийняття рішення типу «2 з 3» (6 ТС в резерві); 6 – ВС з використанням трьох МС, вкладених в МС і правилом збереження працездатності до наявності 1 ядра з 3.

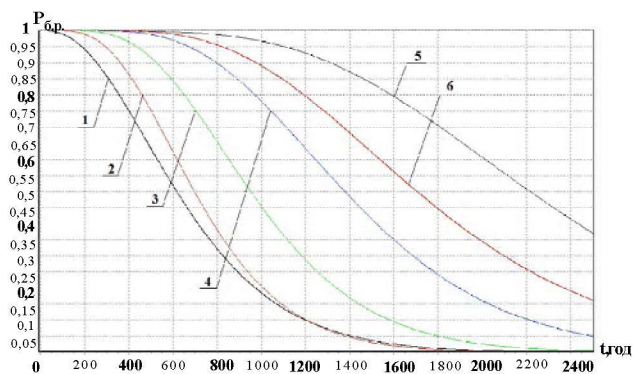


Рис. 4. Залежність ймовірності безвідмовної роботи для ВС з використанням трьох мажоритарних структур вкладених в мажоритарну структуру і ВС на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом прийняття рішення від тривалості їх експлуатації

В табл. 2 і 3 використано наступні скорочення: N – початкова кількість ТС в робочій конфігурації (ядрі); M – початкова кількість ТС в «холодному» резерві; T_c – середнє значення тривалості безвідмовної роботи ВС.

Отримані результати (рис. 4 і табл. 2) при порівнянні ВС з використанням мажоритарних структур вкладених в мажоритарну структуру і ВС на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом прийняття рішення показують, що кращі показники надійності (ймовірність безвідмовної роботи та середнє значення тривалості безвідмовної роботи) при заданому наборі вхідних параметрів дає ВС на основі МС з фіксованим правилом прийняття рішення типу «2 з 3» плюс 6 ТС в резерві. Середнє значення безвідмовної роботи ВС на основі МС з фіксованим правилом прийняття рішення типу «2 з 3» плюс 6 ТС в резерві є більшим, зокрема в порівнянні з ВС №1

Таблиця 2. Середнє значення тривалості безвідмовної роботи для різних варіантів реалізації ВС з використанням трьох мажоритарних структур, вкладених в мажоритарну структуру і ВС на основі мажоритарної структури з фіксованим правилом прийняття рішення

Тип відмовостійкої системи	Параметри відмовостійкої системи			
	N	Наявність ТС в «гарячому» резерві	M	T _c , год
1) ВС з МС в МС і правилом збереження працездатності до наявності 2 ядер з 3	9	в гарячому резерві ТС відсутня	0	684
2) ВС на основі МС з фіксованим правилом прийняття рішення типу «5 з 9»	9	в гарячому резерві ТС відсутня	0	745
3) ВС на основі МС з фіксованим правилом прийняття рішення типу «4 з 7» (2 ТС в резерві)	7	в гарячому резерві 1 ТС	1	1009
4) ВС на основі МС з фіксованим правилом прийняття рішення типу «3 з 5» (4 ТС в резерві)	5	в гарячому резерві 1 ТС	3	1450
5) ВС на основі МС з фіксованим правилом прийняття рішення типу «2 з 3» (6 ТС в резерві)	3	в гарячому резерві 1 ТС	5	2333
6) ВС з МС в МС і правилом збереження працездатності до наявності 1 ядра з 3	9	в гарячому резерві ТС відсутня	0	1815

(табл. 1) на 241 %, ВС № 2 на 213 %, ВС №3 на 131 %, ВС №4 на 60 %, ВС №6 на 28 %.

Такий результат обумовлений тим, що в робочій конфігурації даної ВС знаходиться 3 ТС, одна ТС перебуває в «гарячому» резерві, а решта 5 ТС перебувають в «холодному» резерві. Таким чином ресурс ВС зношується повільніше і відповідно інтенсивність відмови ТС, що перебувають «холодному» резерві нижча.

Задача № 2. Необхідно прийняти рішення, якій ВС (ВС з використанням трьох мажоритарних структур вкладених в мажоритарну структуру чи ВС з реконфігурацією ядра мажоритарної структури) слід віддати перевагу, при конкретних умовах реалізації, заданих вхідними параметрами. Технічна система, на основі якої формується відмовостійка система, має такі параметри: інтенсивність відмов в робочому стані $\lambda_n = 0,001$ 1/год.; інтенсивність відмов, якщо система перебуває в «холодному» резерві $\lambda_m = 0,0001$ 1/год.; тривалість завантаження програмного забезпечення $T = 0,1$ год. Для ВС тривалість підключення ТС з «холодного» резерву в «гарячий» і тривалість підключення ТС з «холодного» резерву в ядро визначає тривалість завантаження програмного забезпечення. Інтенсивність відмов мажоритарного елемента $\lambda_{me} = 0,0001$ 1/год. Результати досліджень і показники надійності подані на рис. 5 і в табл. 3.

Для порівняння розглядаються наступні варіанти ВС: 1 – ВС з використанням трьох МС вкладених в МС і правилом збереження працездатності до наявності 1 ядра з 3; 2 – ВС з реконфігурацією ядра МС, у якого початковий стан відповідає правилу «5 з 9»; 3 – ВС з реконфігурацією ядра МС, у якого початковий стан відповідає правилу «4 з 7» (2 ТС в резерві); 4 – ВС з реконфігурацією ядра МС, у якого початковий стан відповідає правилу «3 з 5» (4 ТС в резерві); 5 – ВС з використанням трьох МС вкладених в МС і правилом збереження працездатності до наявності 2 ядер з 3.

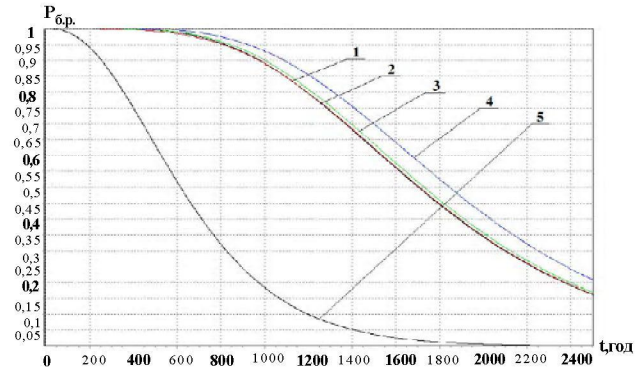


Рис. 5. Залежність ймовірності безвідмовної роботи для ВС з використанням трьох мажоритарних структур вкладених в мажоритарну структуру і ВС з реконфігурацією ядра мажоритарної структури від тривалості їх експлуатації

Отримані результати (рис. 5 і табл. 3) при порівнянні ВС з використанням трьох мажоритарних структур вкладених в мажоритарну структуру і ВС з реконфігурацією ядра мажоритарної структури показують, що кращі показники надійності (ймовірність безвідмовної роботи та середнє значення тривалості безвідмовної роботи) при заданому наборі вхідних параметрів, дає ВС з реконфігурацією ядра мажоритарної структури типу «3 з 5» плюс 4 ТС в резерві. Середнє значення безвідмовної роботи ВС з реконфігурацією ядра мажоритарної структури типу «3 з 5» плюс 4 ТС в резерві є більшим, зокрема в порівнянні з ВС №1 (табл. 3) на 7 %, ВС №2 на 6 %, ВС №3 на 5 %, ВС №5 на 185 %. Цей результат обумовлений тим, що 4 ТС перебувають в «холодному» резерві, таким чином зберігаючи свій робочий ресурс.

Таблиця 3. Середнє значення тривалості безвідмовної роботи для різних варіантів реалізації ВС з використанням трьох мажоритарних структур, вкладених в мажоритарну структуру і ВС з реконфігурацією ядра мажоритарної структури

Тип відмовостійкої системи	Параметри відмовостійкої системи			
	N	Наявність ТС в «гарячому» резерві	M	Tс, год
1) ВС з МС в МС і правилом збереження працездатності до наявності 1 ядра з 3	9	в гарячому резерві ТС відсутня	0	1815
2) ВС з реконфігурацією ядра МС початковий стан відповідає правилу «5 з 9»	9	в гарячому резерві ТС відсутня	0	1827
3) ВС з реконфігурацією ядра МС початковий стан відповідає правилу «4 з 7» (2 ТС в резерві)	7	в гарячому резерві 1 ТС	1	1842
4) ВС з реконфігурацією ядра МС початковий стан відповідає правилу «3 з 5» (4 ТС в резерві)	5	в гарячому резерві 1 ТС	3	1949
5) ВС з МС в МС і правилом збереження працездатності до наявності 2 ядер з 3	9	в гарячому резерві ТС відсутня	0	684

ВИСНОВКИ

Результати порівняння ВС з використанням трьох мажоритарних структур вкладених в мажоритарну структуру, ВС з мажоритарною структурою і фіксованим правилом прийняття рішення та ВС з реконфігурацією ядра мажоритарної структури, реалізованих з однакової кількості технічних систем (9 ТС) продемонстрували, що кращі показники надійності при заданих вхідних параметрах та умовах (ймовірність безвідмовної роботи на інтервалі експлуатації та середнє значення тривалості безвідмовної роботи) забезпечує ВС з МС і фіксованим правилом прийняття рішення типу «2 з 3» плюс 6 ТС в резерві. Зокрема, середнє значення тривалості безвідмовної роботи ВС з МС і фіксованим правилом прийняття рішення типу «2 з 3» плюс 6 ТС в резерві на 28% є більшим в порівнянні з аналогічним показником для ВС з використанням трьох мажоритарних структур, вкладених в мажоритарну структуру, яка зберігає працездатність коли залишилось справним 1 ядро з 3, і на 7% є більшим в порівнянні з показником, отриманим для ВС з реконфігурацією ядра мажоритарної структури типу «3 з 5» плюс 4 ТС в резерві.

Розроблені моделі відмовостійких систем призначені для розв'язання задач надійнісного проектування радіоелектронних засобів довготривалої експлуатації. Тому, в залежності від умов експлуатації радіоелектронних засобів, для підвищення точності визначення показників надійності, актуальною задачею є розробка моделей з врахуванням ефекту їх старіння.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Арсеньев, Ю. Н.* Проектирование систем логического управления на микропроцессорных средствах / Ю. Н. Арсеньев, В. М. Журавлев. – М.: Высшая школа, 1991. – 319 с.
2. *Мандзий, Б. А.* Оцінювання показників надійності відмовостійкої системи на основі мажоритарної структури з врахуванням параметрів стратегії аварійного відновлення / Б. А. Мандзий, Б. Ю. Волочий, Л. Д. Озірковський [та ін.] // Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіотехніка та телекомунікації. – 2011. – № 705. – С. 216–224.
3. *Sklyar, V.* Reliability and Availability Analysis of FPGA-based Instrumentation and Control Systems, 2011 / Sklyar V., Kharchenko V., Siora A. [and other] // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) : proceedings of the 11th International Conference CADSM'2011, (February 23–25, 2011). – Pp. 27–33.
4. *Lala, J. H.* A Design Approach for Ultra Reliable Real-Time Systems IEEE Computer / J. H. Lala, R. B. Harper, L. S. Alger, 1991. – Pp. 12–22.
5. *Панченко, С. В.* Дослідження мажоритарної структури системи з відновленням / С. В. Панченко, Н. Г. Панченко, А. А. Меліхов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 5. – С. 62–68.
6. *Волочий, Б. Ю.* Оцінка ефективності використання відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра мажоритарної структури / Б. Ю. Волочий, Л. Д. Озірковський, М. М. Змисний // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування, Київ, 2012. – С. 117–125.

7. *Кривонос, А. И.* Структурно-алгоритмическая организация и модели надежности мажоритарно-резервированных систем / А. И. Кривонос, Н. К. Байда, А. А. Кулаков [та ін.] // Космічна наука і технологія. – 1995. – № 1. – С. 74–79.
8. *Чуканов, В. О.* Надежность программного обеспечения и аппаратных средств систем передачи данных атомных электростанций / В. О. Чуканов. М.: МИФИ, 2008. – 168 с.
9. *Волочий, Б. Ю.* Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем / Б. Ю. Волочий. – Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2004. – 220 с.
10. *Змисний, М. М.* Дослідження ефективності відмовостійкої системи з використанням вкладених мажоритарних структур в мажоритарну структуру / М. М. Змисний, О. В. Муляк // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: матеріали II Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2012. – Тернопіль: 2012. – С. 29–31.

Стаття надійшла до редакції 02.10.2012.

Після доробки 05.10.2012.

Мандзий Б. А., Волочий Б. Ю., Озірковський Л. Д., Змисний М. М., Муляк О. В.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТРЕХ КОНФИГУРАЦИЙ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ СИСТЕМЫ С МАЖОРИТАРНОЙ СТРУКТУРОЙ

В статье осуществлено сравнение надежности, которую могут обеспечивать отказоустойчивые системы с мажоритарной структурой, а именно: три мажоритарные структуры вложенные в мажоритарную структуру, мажоритарная структура с реконфигурацией ядра и мажоритарная структура с фиксированным правилом принятия решения. Разработка моделей отказоустойчивых систем осуществлена с помощью технологии аналитического моделирования с представлением их в виде дискретно-непрерывной стохастической системы.

Ключевые слова: надежность, отказоустойчивая система, мажоритарная структура

Mandziy B. A., Volochiy B. Yu., Ozirkovskiy L. D., Zmysnyi M. M., Muliak O. V.

THE COMPARATIVE RELIABILITY EVALUATION FOR THREE CONFIGURATION OF THE FAULT-TOLERANT SYSTEM WITH MAJORITY STRUCTURE

A comparison of reliability, which can provide the fault-tolerant system with a majority structure, namely: three majority structure embedded in majority structure, majority structure with the reconfiguration of the core structure and majority structure with a fixed rule decision was performed in the paper. Designing of fault-tolerant systems implemented with the help of analytical modeling with representation them as discrete-continuous stochastic system. Results of the comparison showed that mean time to failure for fault-tolerant system based on majority structure with fixed rule decision such as «2 of 3» plus 6 technical systems in reserve by 28% higher compared with the fault-tolerant system using three majority structures embedded in majority structure and by 7% higher compared with the rate obtained for fault-tolerant system with reconfiguration of core of majority structure type structure «3 of 5» plus 4 technical systems in reserve.

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

REFERENCES

1. *Arsen'ev J. N., Guravl'ev V. M.* Proekirovanie system logicheskoho upravleniya na micro-procesorny'kh sredstvakh. Moscow, Vysshaya shkola, 1991, 319 p.

2. Madzyi B. A., Volochyi B. Yu., Ozirkovskiy L. D., Zmysnyi M. M., Kulyk B. A. Ocinjuvannya pokaznykiv nadiinosti vidmovostiikoi systemy na osnovi mazhorytarnoi struktury z vrakhuvannyam parametriv stratehii avariinoho vidnovlennya. Visnyk NU «Lvivs'ka politekhnika». *Radiotekhnika ta telekomunikacii*, 2011, No.705, pp. 216–224.
3. Sklyar V., Kharchenko V., Siora A., Malokhatko S., Golovir V., Belyu. Reliability and Availability Analysis of FPGA-based Instrumentation and Control Systems, 2011 *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM) : proceedings of the 11th International Conference CADSM'2011*, (February 23–25, 2011), pp. 27–33.
4. Lala J. H., Harper R. B., Alger L. S. A Design Approach for Ultra Reliable Real-Time Systems IEEE Computer. 1991, pp. 12–22.
5. Panchenko S. V., Panchenko A. A., Melikhov N. H. Doslidzhennya mazhorytarnoi struktury systemy z vidnovlenniam, *Informacino-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 2010, No.5, pp. 62–68.
6. Volochyi B. Yu., Ozirkovskiy L. D., Zmysnyi M. M. Ocinka efektyvnosti vykorystannya vidmovostiikoi systemy z rekonfiguraciyu yadra mazhorytarnoi sruktury, Visnyk Nacionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut» Seriya – *Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannya*, Kyiv, 2012, pp. 117–125.
7. Kryvonosov A. I., Baida N. K., Kulakov A. A., Kharchenko V. S. Blahodarny'I N. P., Strukturno-alhoretmicheskaya organizaciya i modeli nadezhnosti mazhorytarno-rezervirovanykh system, *Kosmichna nauka i tekhnolohiya*, 1995, No.1, pp. 74–79.
8. Chukanov V. O. Nadezhnost' prohrannoho obespecheniya i aparatny'h sredstv system peredachi danny'h atomnyh elektrostancii. Moscow, MIFI, 2008, 168 p.
9. Volochyi B. Yu. Tekhnolohiya modelyuvannya alhorytmiv povedinky informaciiynykh system. Lviv, Vydavnytvo NU «Lvivs'ka polikhnika», 2004, 220 p.
10. Zmysnyi M. M., Muliak O. V. Doslidzhennya efektyvnosti vidmovostiikoi systemy z vykorystannyam vkladenykh mazhorytarnykh struktur v mazhorytarnu strukturu, *Suchasni komputerni informaciiini tekhnolohii: Materialy II Vseukrainskoi shkoly-seminaru molodykh vchenykh I studentiv ACIT'2012*, Ternopil', 2012, pp. 29–31.