

---

---

## КОНСТРУЮВАННЯ РАДІОАПАРАТУРИ

УДК 621.396.6.019.3+519.87

### ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДМОВОСТІЙКОЇ СИСТЕМИ З РЕКОНФІГУРАЦІЄЮ ЯДРА МАЖОРИТАРНОЇ СТРУКТУРИ

*Волочій Б.Ю., д.т.н., професор; Озірковський Л.Д., к.т.н., доцент;  
Змисний М.М., аспірант*

*Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна*

#### Постановка задачі

Для необслуговуваних програмно-апаратних радіоелектронних засобів (РЕЗ), призначених для довготривалої безперервної експлуатації, надійність забезпечують шляхом використання відмовостійкої системи (ВС) на основі мажоритарної структури (МС) з фіксованим правилом прийняття рішення і ковзним резервуванням технічних систем (ТС) ядра [1, с.156; 2, с.101]. Підвищення надійності ВС з МС забезпечує процедура реконфігурації показана в [3], де розглядаються ВС на основі МС типу “2 з 3” та “3 з 5”. Відмовостійка система із структурою типу “2 з 3” після відмови двох ТС ядра реконфігурує, тобто продовжує роботу остання працездатна ТС. Відмовостійка система із структурою типу “3 з 5” після відмови трьох ТС ядра продовжує роботу, як ВС з однократним резервуванням. В цих варіантах реалізації процедури реконфігурації ВС втрачає позитивні якості мажоритарного принципу, а саме: захист від збоїв; відсутність перерв у роботі при відмові ТС; простоту процедури контролю та діагностики. Моделі цих систем розроблені з допущенням про те, що мажоритарний елемент (відновлюючий орган) є безвідмовним. Це обумовлює абсолютну надійність процедури реконфігурації, що в свою чергу знижує ступінь адекватності запропонованих моделей. Також не враховується можливість використання ковзного резерву.

Практичний інтерес має процедура реконфігурації ядра МС, яка дозволяє зберегти мажоритарний принцип при зменшенні кількості працездатних ТС в ядрі. Однак у відомих публікаціях про відмовостійкі системи з МС відсутня модель для оцінки ефективності такої процедури реконфігурації в порівнянні з іншими реалізаціями ВС з МС.

Для вирішення поставленої задачі створено 2 моделі, в яких враховано: зміну правила прийняття рішення і відповідну реконфігурацію ядра МС, наявність ковзного резервування ТС ядра, ненадійну роботу мажоритарного елемента (МЕ) та комутатора ковзного резерву. За допомогою цих моделей проведено порівняння надійності ВС з МС з реконфігурацією ядра і без реконфігурації. Досліджено залежність показників надійності ВС від

двох умов запуску процедури реконфігурації. Показано доцільну надійність мажоритарного елемента.

### Особливості структури відмовостійкої системи

В склад ВС на основі МС, структура якої представлена в [1], входять: ядро МС, яке складають ТС робочої конфігурації; ТС ковзного резерву; мажоритарний елемент; детектор розузгодження; комутатор. Початкова непарна кількість ТС в ядрі може бути довільною з відповідним правилом прийняття рішення. Серед ТС, які перебувають в резерві, перша до підключення перебуває в навантаженому резерві, а всі інші – в ненавантаженому. Переведення ТС в навантажений резерв, в програмно-апаратних РЕЗ, означає подачу напруги електроживлення і завантаження програмного забезпечення. Для резервних ТС передбачено контроль та діагностику. Надійність детектора розузгодження, засобів контролю та діагностики резервних ТС є значно вищою від інших складових ВС.

### Процедури, що формують поведінку відмовостійкої системи

*Процедура 1.* Виявлення несправної ТС в ядрі та її відключення.

*Процедура 2.* Підключення ТС з навантаженого резерву в ядро. Процедура породжує альтернативу пов'язану з підключенням або не підключенням ТС навантаженого резерву в ядро, що виникає в результаті збою в роботі комутатора. При не підключенні ТС в ядро кількість ТС резерву не змінюється. При наступній потребі заміни ТС в ядрі вона може бути підключена.

*Процедура 3.* Переведення ТС із ненавантаженого резерву в навантажений резерв. Ця процедура характеризується тривалістю, яку визначають затрати часу на завантаження програмного забезпечення. Процедура може бути успішною і неуспішною. В першому випадку відбувається переведення ТС із ненавантаженого резерву в навантажений. В другому випадку відбувається вилучення ТС з ненавантаженого резерву. При наступному звертанні до ненавантаженого резерву комутатор може перевести в навантажений резерв іншу ТС.

*Процедура 4.* Реконфігурація ядра МС. Дана процедура передбачає зміну правила прийняття рішення у МЕ і зміну кількості ТС в ядрі. Розглядається два варіанти умови запуску процедури реконфігурації ядра МС.

1. В першому варіанті реконфігурація ядра МС відбувається після першої відмови будь-якої ТС в ядрі, коли має місце не підключення ТС з резерву або вичерпано ковзний резерв. Детектор розузгодження, після виявлення порушення працездатності однієї ТС в ядрі і встановлення того факту, що порушенням працездатності є відмова, а не збій, подає команду у МЕ про реконфігурацію. Після цього одна ТС переводиться в резерв, а в ядрі міняється правило прийняття рішення. Наприклад, якщо в ядрі 9 ТС і правило прийняття рішення було "5 з 9", тоді після реконфігурації в ядрі

стає 7 ТС, а правило прийняття рішення змінюється на “4 з 7”. Ненадійність МЕ породжує альтернативу пов’язану з проведенням або не проведенням реконфігурації ядра МС. В другому випадку ВС втрачає здатність до реконфігурації, але забезпечує працездатність до моменту, коли в ядрі залишиться  $((n-1)/2)$  ТС.

2. В другому варіанті реконфігурація ядра МС відбувається в передавальній ситуації, коли кількість ТС в ядрі є мінімальною для правильної роботи МС, тобто  $((n+1)/2)$ . Для конфігурацій відмовостійких систем, коли ядро МС має парну кількість ТС, “зайва” ТС ядра переводиться в ковзний резерв. Наприклад, якщо в ядрі 7 ТС і правило прийняття рішення було “4 з 7”, то після реконфігурації в ядрі стає 3 ТС, а правило прийняття рішення змінюється на “2 з 3”. Як і в першому варіанті умови запуску процедури реконфігурації ненадійність МЕ породжує альтернативу пов’язану з проведенням або не проведенням реконфігурації ядра МС. В другому випадку ВС продовжує працювати без змін і при черговій відмові ТС в ядрі переходить в стан катастрофічної відмови.

Для розробки моделей ВС використовується удосконалена технологія аналітичного моделювання поведінки дискретно-неперервних стохастичних систем, яка забезпечує автоматизовану побудову моделі у вигляді графа станів та переходів на основі представлення об’єкту дослідження у вигляді структурно-автоматної моделі [4]. Ця технологія реалізована в програмному модулі ASNA-1.

#### **Розробка структурно-автоматних моделей відмовостійкої системи**

Згідно постановки задачі розроблено дві моделі ВС для двох умов запуску реконфігурації ядра МС, відповідно модель №1 та модель №2.

З представлення поведінки ВС складається перелік подій, які можуть відбуватися в даній ВС. Події слід представляти парами, фіксуючи початок і закінчення відповідного часового інтервалу, який відповідає певному стану ВС. Події, що відбуваються у ВС, обумовлені надійністю поведінкою, представлено в табл. 1. Аналіз поданих в таблиці подій дозволяє визначити базові події.

В перелік базових подій включено події: „Відмова ТС в ядрі МС”, „Відмова резервної ТС (навантажений резерв)”, „Відмова резервної ТС (ненавантажений резерв)”, „Закінчення процедури підключення ТС з навантаженого резерву в ядро МС”, „Закінчення процедури переведення ТС з ненавантаженого резерву в навантажений”, „Закінчення процедури реконфігурації ядра МС”. Відповідно до визначених базових подій розроблено 2 структурно-автоматні моделі ВС з реконфігурацією ядра МС.

Структурно-автоматна модель № 1 для першого варіанту умов запуску процедури реконфігурації подано в табл. 2, в якій використано такі скорочення: ФРІБП – формула розрахунку інтенсивності базової події; ФРІАП – формула розрахунку ймовірності альтернативного переходу;

ПМКВС – правило модифікацій компонент вектора стану.

Таблиця 1. Представлення пар подій, які фіксують початок і закінчення часового інтервалу перебування досліджуваної відмовостійкої системи в певному стані

№ пари подій	Подія, яка фіксує початок ...	Подія, яка фіксує закінчення ...	Середнє значення тривалості часового інтервалу між подіями, [сек]
1	„Початок роботи системи”	„Відмова ТС в ядрі МС”	$\bar{t}_1$
2	„Початок роботи системи”	„Відмова резервної ТС (навантажений резерв)”	$\bar{t}_2$
3	„Початок роботи системи”	„Відмова резервної ТС (ненавантажений резерв)”	$\bar{t}_3$
4	„Початок процедури виявлення несправної ТС в ядрі МС”	„Закінчення процедури виявлення несправної ТС в ядрі МС”	$\bar{t}_4$
5	„Початок процедури відключення несправної ТС з ядра”	„Закінчення процедури відключення несправної ТС з ядра”	$\bar{t}_5$
6	„Початок процедури підключення ТС з навантаженого резерву в ядро МС”	„Закінчення процедури підключення ТС з навантаженого резерву в ядро МС”	$\bar{t}_6$
7	„Початок процедури переведення ТС з ненавантаженого резерву в навантажений”	„Закінчення процедури переведення ТС з ненавантаженого резерву в навантажений”	$\bar{t}_7$
8	„Початок процедури реконфігурації ядра МС”	„Закінчення процедури реконфігурації ядра МС”	$\bar{t}_8$

Структурно-автоматна модель враховує наступні параметри ВС:

- ✓  $n$  – початкова кількість ТС в ядрі МС;
- ✓  $m$  – кількість ТС ненавантаженого резерву;
- ✓  $\lambda_n$  – інтенсивність відмов працюючої ТС в ядрі МС або резерві (навантажений резерв);
- ✓  $\lambda_m$  – інтенсивність відмов резервної ТС (ненавантажений резерв);
- ✓  $P_{ME}$  – ймовірність успішного виконання процедури реконфігурації;
- ✓  $P_{K1}$  – ймовірність успішного підключення ТС з резерву в ядро;
- ✓  $P_{K2}$  – ймовірність успішного переведення ТС з стану ненавантаженого резерву в навантажений;
- ✓  $T_h$  – середня тривалість заміни несправної ТС в ядрі на ТС з резерву;
- ✓  $T_c$  – середня тривалість переведення ТС з стану ненавантаженого резерву в навантажений;
- ✓  $T_r$  – середня тривалість реконфігурації ядра МС.

*Вектор станів відмовостійкої системи для моделі №1 представлений наступними компонентами:*

**V1** – відображає поточну кількість працездатних ТС в ядрі (початкове значення компоненти V1 дорівнює n);

**V2** – відображає поточну кількість несправних ТС в ядрі (початкове значення компоненти V2 дорівнює нулю);

**V3** – відображає наявність ТС в навантаженому резерві: 1 – ТС наявна; 0 – ТС відсутня (початкове значення компоненти V3 встановлюється в 1 або 0 в залежності від досліджуваної структури);

**V4** – відображає поточну кількість справних ТС в ненавантаженому резерві (початкове значення компоненти V4 дорівнює m);

**V5** – відображає поточне значення мінімальної кількості ТС в ядрі, які необхідні для правильної роботи МЕ (початкове значення компоненти V5 дорівнює  $(n+1)/2$ );

**V6** – відображає поточне значення кількості ТС в ядрі, при якій відбувається процедура реконфігурації (початкове значення компоненти V6 дорівнює n-1);

**V7** – ознака тимчасового стану. Ця компонента потрібна для того, щоб при визначенні станів не формувалися зайві стани. Значення V7 встановлюється в одиницю при події „Відмова ТС в ядрі” і скидається в нуль при події „Закінчення процедури підключення ТС з навантаженого резерву в ядро MC” (початкове значення компоненти V7 рівне нулю);

**V8** – компонента, яка забезпечує можливість переходу в режим формування моделі BC на основі MC без реконфігурації: 1 – модель BC з реконфігурацією ядра MC; 0 – модель BC без реконфігурації ядра MC.

Таблиця 2. Структурно-автоматна модель №1 відмовостійкої системи

Базові події	Умови та обставини	ФРІБП	ФРІАП	ПМКВС
1. Відмова ТС в ядрі MC	$(V1 > 0) \text{ AND } (V7 = 0)$	$V1 * \lambda_n$	1	$V1 := V1 - 1;$ $V2 := V2 + 1; V7 := 1$
2. Закінчення процедури підключення ТС з навантаженого резерву в ядро MC.	$(V2 > 0) \text{ AND } (V3 = 1) \text{ AND } (V7 = 1)$	1/Th	$P_{K1}$	$V1 := V1 + 1; V2 := V2 - 1;$ $V3 := 0; V7 := 0$
			$1 - P_{K1}$	$V2 := V2 - 1; V7 := 0$
	$(V2 > 0) \text{ AND } (V3 = 0) \text{ AND } (V7 = 1)$	1/Th	1	$V2 := V2 - 1; V7 := 0$
3. Закінчення процедури переведення ТС з ненавантаженого резерву в навантажений	$(V3 = 0) \text{ AND } (V4 > 0)$	1/Tc	$P_{K2}$ $1 - P_{K2}$	$V3 := 1; V4 := V4 - 1$ $V4 := V4 - 1$
4. Відмова резервної ТС (навантаж. резерв).	$(V3 = 1)$	$\lambda_n$	1	$V3 := 0$

Таблиця 2. (Продовження)

Базові події	Умови та обставини	ФРІБП	ФРІАП	ПМКВС
5. Відмова резервної ТС (ненавантажений резерв).	$(V4 > 0)$	$V4 * \lambda_m$	1	$V4 := V4 - 1$
6. Закінчення процедури реконфігурації ядра МС.	$(V1 = V6) \text{ AND } (V1 \geq 3) \text{ AND } (V2 = 0) \text{ AND } (V3 = 0) \text{ AND } (V8 = 1)$	1/Tr	$P_{ME}$	$V1 := V1 - 1;$ $V3 := 1;$ $V6 := V6 - 2$
			$1 - P_{ME}$	$V1 := V1 - 1;$ $V2 := V2 + 1;$ $V7 := 1$
	$(V1 = V6) \text{ AND } (V1 \geq 3) \text{ AND } (V2 = 0) \text{ AND } (V3 = 1) \text{ AND } (V8 = 1)$	1/Tr	$P_{ME}$	$V1 := V1 - 1;$ $V4 := V4 + 1;$ $V6 := V6 - 2$
			$1 - P_{ME}$	$V1 := V1 - 1;$ $V2 := V2 + 1;$ $V7 := 1$
Критерій катастрофічної відмови: $(V1 < V5)$				

Структурно-автоматні моделі є універсальними для ВС на основі МС, з ковзним резервуванням її робочих ТС та реконфігурацією ядра МС. В розроблених моделях ВС прийнято, що тривалість всіх процесів, які відбуваються в системі мають експоненційний розподіл і відповідно інтенсивності подій є сталими в часі величинами.

Розроблені структурно-автоматні моделі є вхідними даними для програмного модуля ASNA-1, за допомогою якого проведено необхідні дослідження.

### **Дослідження ефективності використання відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра мажоритарної структури**

1. Порівняння двох граничних варіантів вибору умови запуску процедури реконфігурації ядра МС. Розрахунки проведені при наступних значеннях параметрів ВС: початкова кількість ТС в ядрі  $n = 5$ ; інтенсивність відмов ТС  $\lambda_n = 100$  відмов/ $10^6$  год.; середнє значення тривалості заміни несправної ТС в ядрі на ТС з резерву  $T_h = 0,01$  год.; середнє значення тривалості переведення ТС з стану ненавантаженого резерву в навантажений  $T_c = 0,1$  год.; середнє значення тривалості процедури реконфігурації ядра МС  $T_r = 0,01$  год.; ймовірність успішного виконання процедури реконфігурації  $P_{ME} = 0,999$ ; ймовірність успішного підключення ТС з резерву в ядро  $P_{K1} = 0,999$ ; ймовірність успішного переведення ТС з стану ненавантаженого резерву в навантажений  $P_{K2} = 0,999$ . Дослідження показали, що умова запуску процедури реконфігурації ядра МС не впливає на показники надійності ВС. Тому при проектуванні необслуговуваних програмно-апаратних РЕЗ, використання ВС з першим або другим варіантом реконфігурації ядра МС не є принциповим, при однакових заданих вхідних параметрах.

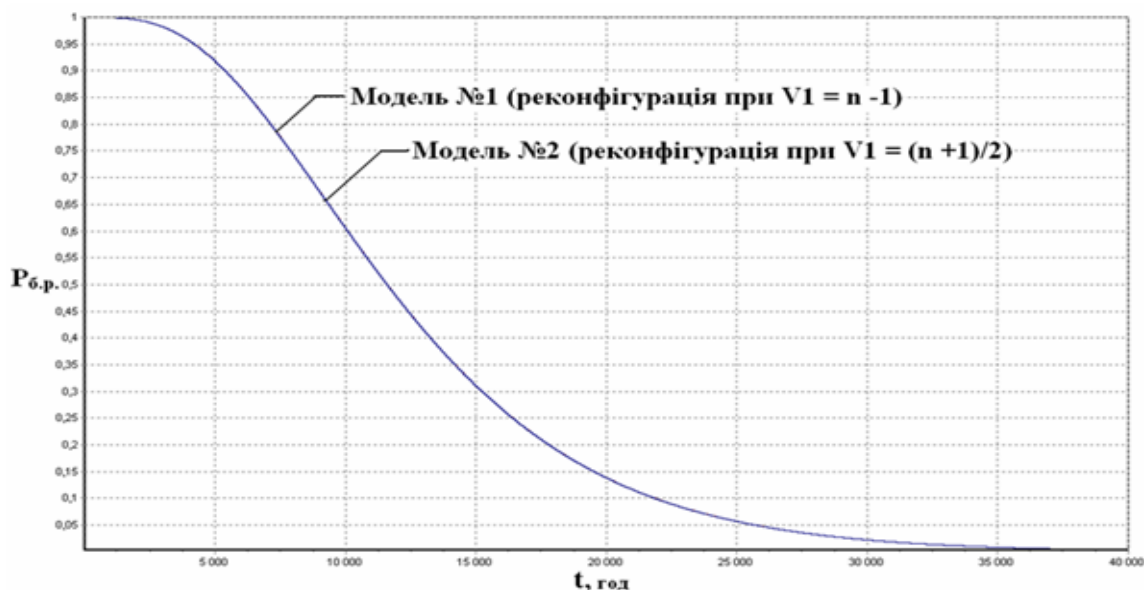


Рис. 1. Залежність ймовірності безвідмовної роботи ВС від тривалості її експлуатації

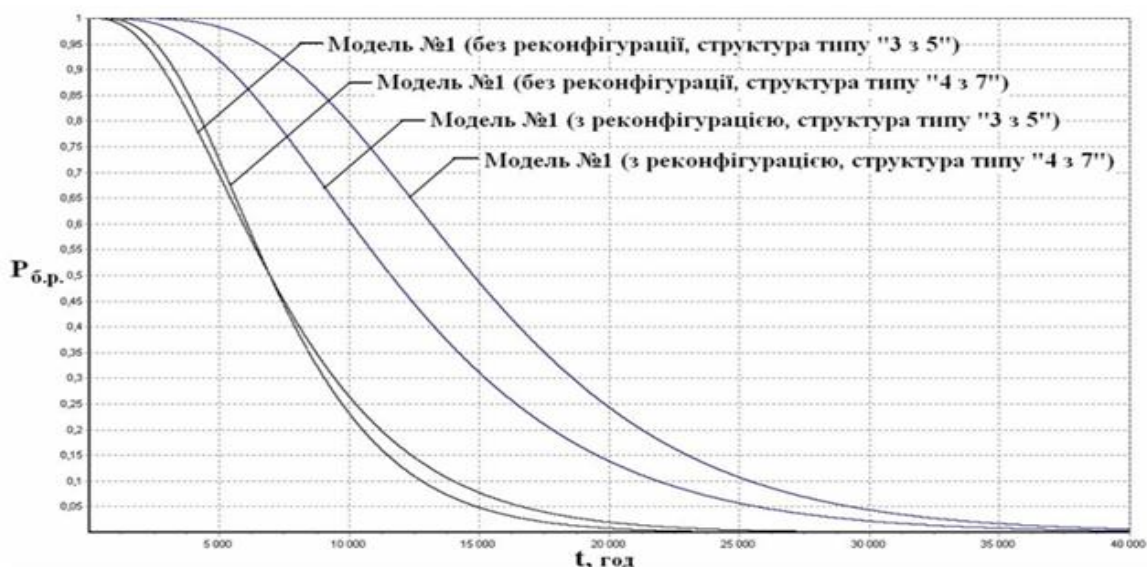


Рис. 2. Залежність ймовірності безвідмовної роботи ВС від тривалості її експлуатації

2. Необхідно порівняти надійність РЕЗ в двох варіантах реалізації ВС на основі МС: з реконфігурацією після першої відмови ТС в ядрі та без реконфігурації ядра МС. Дослідження проведені при значеннях параметрів, які приведені вище.

Дослідження показали, що застосування ВС з процедурою реконфігурації ядра МС в порівнянні з ВС на основі МС без реконфігурації покращує надійність представлену середнім значенням тривалості роботи до катастрофічної відмови: для ВС з правилом голосування "4 з 7" більше ніж в 2 рази; для ВС з правилом голосування "3 з 5" більше ніж 1,5 рази.

3. Визначення залежності надійності РЕЗ, для моделі ВС з умовою запуску процедури реконфігурації після першої відмови ТС в ядрі, при різ-



них значеннях ймовірності успішного проведення процедури реконфігурації. Значення параметрів ВС: початкова кількість ТС в ядрі  $n = 7$ ; інтенсивність відмов ТС  $\lambda_n = 100$  відмов/ $10^6$  год.

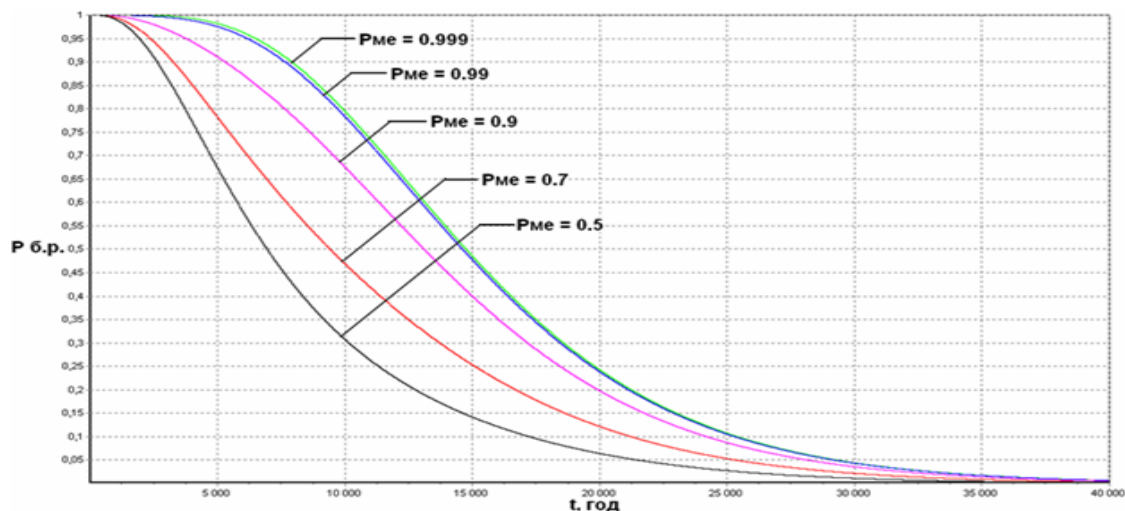


Рис. 3. Залежність ймовірності безвідмовної роботи ВС від тривалості її експлуатації  
Проведені дослідження, демонструють, що для забезпечення високої надійності необслуговуваних програмно-апаратних РЕЗ, ймовірність успішного виконання процедури реконфігурації ядра МС повинна бути не нижче  $P_{ME} = 0,99$ . Використання більш надійного, а відповідно дорожчого МЕ для досліджуваної ВС не дає збільшення середнього значення тривалості роботи РЕЗ до катастрофічної відмови та ймовірності безвідмовної роботи.

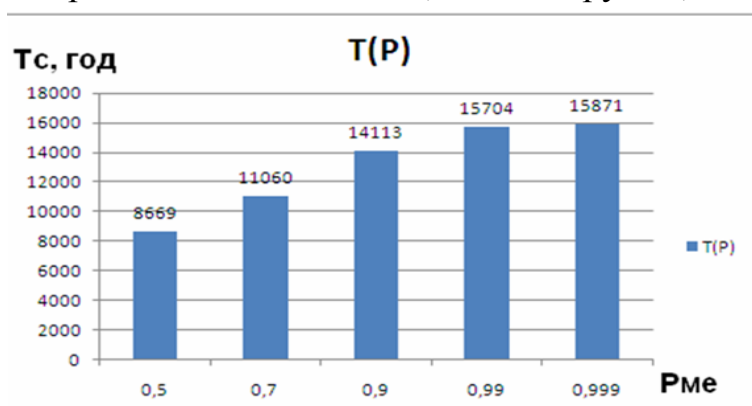


Рис.4. Залежність зміни середню знач.тривалості роботи досліджуваної ВС не дає збільшення середнього значення тривалості роботи РЕЗ до катастрофічної відмови та ймовірності безвідмовної роботи.

### Висновки

Використання відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра мажоритарної структури у необслуговуваних програмно-апаратних РЕЗ дає суттєве підвищення їх надійності в порівнянні з аналогічною ВС без реконфігурації.

Проведеним дослідженням встановлено, що різні умови запуску процедури реконфігурації не впливають на значення показників надійності.

Застосування процедури реконфігурації ядра мажоритарної структури, дає змогу використати не відпрацьований ресурс та зберегти мажоритарний принцип при зменшенні кількості працездатних технічних систем в ядрі.

### Література

1. Арсеньев Ю.Н. Проектирование систем логического управления на микропроцессорных средствах / Ю.Н. Арсеньев, В.М. Журавлев. – М.: Высш. школа, 1991. 319 с.



2. Надежность и эффективность в технике. Справ. Т.4: Методы подобия в надежности / Под ред. В.А. Мельникова, Н.А. Северцева. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.

3. Федухин А.В. Моделирование надежности невосстанавливаемой системы со структурой типа «К из N» с реконфигурацией / А.В. Федухин, Н.В. Сеспедес-Гарсия // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2009. – №7(41). – С. 82–84.

4. Волочий Б.Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем / Б.Ю. Волочий. – Львів: Вид-во НУ “Львівська політехніка”, 2004. – 220 с.

*Волочий Б.Ю., Озірковський Л.Д., Змисний М.М. Оцінка ефективності використання відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра мажоритарної структури. Представлено моделі відмовостійкої системи з комбінованим структурним резервуванням, яка включає мажоритарну структуру з N-ю кількістю технічних систем в ядрі та їх ковзне резервування. Експлуатація системи не передбачає технічного обслуговування, а тому розглядається використання процедури реконфігурації ядра мажоритарної структури. За допомогою розроблених моделей проведено порівняння надійності відмовостійкої системи з реконфігурацією ядра і без реконфігурації. Досліджено залежність показників надійності відмовостійкої системи при двох умовах запуску процедури реконфігурації. Показано доцільну надійність мажоритарного елемента.*

**Ключові слова:** надійність, відмовостійка система, мажоритарна структура

*Волочий Б.Ю., Озірковский Л.Д., Змыслный М.М. Оценка эффективности использования отказоустойчивой системы с реконфигурацией ядра мажоритарной структуры. Представлены модели отказоустойчивой системы с комбинированным структурным резервированием, которая содержит мажоритарную структуру с N-м количеством технических систем в ядре и их скользящее резервирование. Эксплуатация системы не предусматривает технического обслуживания, и поэтому рассматривается использование процедуры реконфигурации ядра мажоритарной структуры. С помощью разработанных моделей проведено сравнение надежности отказоустойчивой системы с и без реконфигурации ядра. Исследованы зависимости показателей надежности отказоустойчивой системы при двух условиях запуска процедуры реконфигурации. Определена целесообразная надежность мажоритарного элемента.*

**Ключевые слова:** надежность, отказоустойчивая система, мажоритарная структура

*Volochiy B., Ozirkovskyy L., Zmysnyi M. Evaluation of efficiency of the fault-tolerant systems with reconfiguration of the core of majority structure. Models of fault-tolerant system with a combined structural redundancy, which includes the majority structure with N-th number of technical systems in the core and their sliding redundancy are presented. Exploitation of system does not provide for maintenance and therefore the using procedures of reconfiguration of the core of majority structure are examined. Using the developed models compare the reliability of fault-tolerant system with reconfiguration of the core and without reconfiguration are carried out. The dependence of the reliability of fault-tolerant system under two conditions run procedure of reconfiguration are investigated. The expedient reliability of the majority element are showed.*

**Keywords:** Reliability, Fault-Tolerant System, the Majority Structure.