

УДК 519.718

А.В. ФЕДУХИН*

Р-ЭФФЕКТ ОТ ДЕКОМПОЗИЦИИ ДУБЛИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА РАВНОНАДЕЖНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ

*Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, г. Киев, Украина

Анотація. Робота присвячена питанням надійності невідновлювальних двоканальних систем автоматики і комп'ютерної техніки. Як альтернативні варіанти розглядаються система з поблочним дублюванням (СПД) і система із квазімістковою структурою (КМС). СПД в загальному вигляді являє собою двоканальну систему, що складається з послідовного з'єднання дубльованих вузлів різної надійності. При відмові одного з функціональних субблоків (ФСБ) дубльованого вузла за допомогою схеми контролю і реконфігурації (СКР) проводяться його маскування, виняток з обчислювального процесу і реконфігурація структури системи в режимі роботи «Non Stop». Система з КМС також є двоканальною структурою, але складається з послідовного з'єднання дубльованих вузлів рівної надійності. При цьому технічна елементоемність (рівень надмірності) і функціональність даної системи ідентичні СПД. Система з КМС також є відмовостійкою системою, що забезпечує режим роботи «Non Stop». Як інструментарій для дослідження надійності систем використовується ймовірно-фізичний метод розрахунку (ЙФ-метод), в основі якого лежить дифузійний розподіл наробітку до відмови (DN-розподіл), спеціально формалізований для оцінки надійності електронних, електричних і електромеханічних елементів і систем. При збереженні рівня надмірності розглянутих двоканальних резервованих систем декомпозиція каналів на рівнонадійні дубльовані вузли приводить до R-ефекту – зростання ймовірності безвідмовної роботи системи зі збільшенням кількості вузлів. Наявність R-ефекту встановлено також іншими методами розрахунку і шляхом статистичного моделювання як для невідновлювальних, так і для відновлювальних систем.

Ключові слова: система з поблочним дублюванням, система із квазімістковою структурою, дубльований вузол, ймовірність безвідмовної роботи, R-ефект.

Аннотация. Работа посвящена вопросам надежности невозстанавливаемых двухканальных систем автоматики и компьютерной техники. В качестве альтернативных вариантов рассматриваются система с поблочным дублированием (СПД) и система с квазимостиковой структурой (КМС). СПД в общем виде представляет собой двухканальную систему, состоящую из последовательного соединения дублированных узлов разной надежности. При отказе одного из функциональных субблоков (ФСБ) дублированного узла с помощью схемы контроля и реконфигурации (СКР) производятся его маскирование, вывод из вычислительного процесса и реконфигурация структуры системы в режиме работы «Non Stop». Система с КМС также представляет собой двухканальную структуру, но состоящую из последовательного соединения дублированных узлов равной надежности. При этом техническая элементоемкость (уровень избыточности) и функциональность данной системы идентичны СПД. Система с КМС также является отказоустойчивой системой, обеспечивающей режим работы «Non Stop». В качестве инструментария для исследования надежности систем используется вероятностно-физический метод расчета (ВФ-метод), в основе которого лежит диффузионное распределение наработки до отказа (DN-распределение), специально формализованное для оценки надежности электронных, электрических и электромеханических элементов и систем. При сохранении уровня избыточности рассмотренных двухканальных резервированных систем декомпозиция каналов на равнонадежные дублированные узлы приводит к R-эффекту – росту вероятности безотказной работы системы с увеличением количества узлов. Наличие R-эффекта установлено также другими методами расчета и путем статистического моделирования как для невозстанавливаемых, так и для восстанавливаемых систем.

Ключевые слова: система с поблочным дублированием, система с квазимостиковой структурой, дублированный узел, вероятность безотказной работы, R-эффект.

Abstract. *The work is devoted to the reliability of non-recoverable two-channel automation systems and computer equipment. As alternative options, a system with block duplication (SBD) and a system with a quasi-bridge structure (QBS) are considered. SBD in general is a two-channel system consisting of a series connection of duplicated nodes of different reliability. In case of failure of one of the functional subunits (FSU) of the duplicated node using the control and reconfiguration (SCR) scheme, it is masked, withdrawn from the computational process, and reconfigured the system structure in the “Non Stop” operating mode. A QBS system also represents a two-channel structure, but consisting of a serial connection of duplicated nodes of equal reliability, while the technical element intensity (redundancy level) and the functionality of this system are identical to SPD. The QBS system is also a fail-safe system that provides the “Non Stop” mode of operation. The probabilistic-physical calculation method (WF-method) is used as a tool for studying the reliability of systems, which is based on the diffusion distribution of mean-time-to-failure (DN-distribution), specially formalized for assessing the reliability of electronic, electrical and electromechanical elements and systems. While maintaining the redundancy level of the considered two-channel redundant systems, decomposing the channels into equally reliable duplicated nodes leads to the R-effect – an increase in the likelihood of system uptime with an increase in the number of nodes. The presence of the R-effect was established by other methods of calculation and by statistical modeling for both non-restored and restored systems.*

Keywords: *system with block duplication, system with quasi-bridge structure, duplicated node, probability of failure-free operation, R-effect.*

DOI: 10.34121/1028-9763-2020-2-117-123

1. Введение

При проектировании больших цифровых систем автоматики и вычислительной техники оборудование выполняется в виде так называемых типовых элементов замены (ТЭЗ), на которых размещаются функциональные субблоки (ФСБ). Как правило, ФСБ содержат большую номенклатуру комплектующих (резисторов, конденсаторов, полупроводниковых приборов, интегральных микросхем, миниатюрных реле и т.д.). ТЭЗ имеют ряд типоразмеров и обычно размещаются в специальных шкафах или на стойках. При этом проектировщик решает задачу размещения соответствующего ФСБ на имеющемся типоразмере ТЭЗ, стараясь обеспечить максимальную плотность монтажа комплектующих при соблюдении требований по тепловыделению.

При создании отказоустойчивых систем критического назначения чаще всего применяют аппаратную избыточность, в рамках которой наиболее простым и экономически эффективным является дублирование. Исследованиями установлено, что наиболее выигрышным вариантом дублирования, с точки зрения надежности, является системное дублирование [1], а наиболее эффективным – поблочное, то есть в нашем случае это дублирование на уровне ФСБ. Так поступают ведущие мировые производители отказоустойчивых компьютеров и цифровых систем автоматики [2, 3].

Наши исследования надежности систем с поблочным дублированием привели к созданию так называемых квазимостиковых структур (КМС) [4–7], в основе которых лежит принцип декомпозиции основного функционального ресурса (функционального блока ФБ) на равнонадежные ФСБ, образующие в дальнейшем равнонадежные дублированные узлы (У).

Частным способом деления ФБ на равнонадежные ФСБ является способ, основанный на принципе дихотомии, когда ФБ делится пополам, ФСБ от первого деления снова делятся на равные, с точки зрения надежности, части и т.д. В этом случае количество ФСБ в последовательном канале дублированной системы будет четным. Однако при проектировании дублированных систем с КМС это условие не является строго необходимым, поэтому решение о количестве ФСБ принимает проектировщик. И это количество может быть как четным, так и нечетным.

Целью настоящего исследования является сравнительная оценка вероятности безотказной работы (ВБР) двух невосстанавливаемых систем – системы с поблочным дублированием и двухканальной системы с КМС.

2. Вероятностно-физический метод расчета надежности систем

В качестве инструментария для исследования надежности систем будет использоваться вероятностно-физический метод расчета (ВФ-метод) [8], в основе которого лежит диффузионное распределение наработки до отказа (*DN*-распределение), специально формализованное для случая немонотонных реализаций определяющего параметра-критерия годности.

DN-распределение является двухпараметрической моделью надежности с параметрами: формы (коэффициент вариации изменения определяющего параметра) и масштаба (средняя наработка до отказа). Расчетные оценки этих параметров для двух типов структурных схем надежности (ССН) приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Оценки параметров *DN*-распределения для типовых ССН

Тип структуры	Параметр <i>DN</i> -распределения	
Последовательное соединение элементов	формы $V = V_0$	(1)
	масштаба $T = \left(\sum_{i=1}^N n_i T_{0i}^{-2} \right)^{-1/2}$,	(2)
	для равнонадежных элементов $T = \frac{T_0}{\sqrt{n}}$	(3)
Параллельное соединение элементов	формы $V = V_0 n^{-1/2}$,	(4)
	масштаба $T = T_0 n^{1/2}$	(5)

В табл. 1 использованы следующие обозначения: V_0 – коэффициент вариации наработки до отказа элемента системы, N – количество типов элементов системы, n_i – количество элементов системы i -го типа, T_{0i} – средняя наработка до отказа элемента системы i -го типа, n – количество равнонадежных элементов системы.

3. Система с поблочным дублированием составных частей

Анализ надежности системы с поблочным дублированием (СПД) начинается с оценки средней наработки до отказа последовательного канала ($T_{ПК}$) системы (табл. 2) по формуле (2), так как все ФСБ системы имеют разные показатели надежности (средние наработки до отказа T_i).

Таблица 2 – Оценка средней наработки до отказа последовательного канала

№ п/п	Обозначение ФСБ	Средняя наработка до отказа T_i , ч	$T_{ПК} = \left(\sum_{i=1}^N T_i^{-2} \right)^{-1/2}$, ч
1	ФСБ1	30000	8452
2	ФСБ2	10000	
3	ФСБ3	80000	

4	ФСБ4	40000	
5	ФСБ5	20000	

Далее проектируется СПД в виде последовательного соединения дублированных узлов (У) и вычисляется средняя наработка до отказа узлов (T_{iY}) (табл. 3) по формуле (5).

Таблица 3 – Расчет надежности дублированных узлов

№ п/п	Обозначение узла	Средняя наработка до отказа ФСБ T_i , ч	$T_{iY} = T_i \sqrt{2}$, ч
1	У1	30000	42300
2	У2	10000	14100
3	У3	80000	112800
4	У4	40000	56400
5	У5	20000	28200

Расчет надежности СПД (средней наработки до отказа дублированной системы $T_{ДС}$) (табл. 4) осуществляется по формуле (2) для последовательного соединения дублированных узлов с разными T_{iY} .

Таблица 4 – Расчет средней наработки до отказа дублированной системы

№ п/п	Обозначение узла	Средняя наработка до отказа T_{iY} , ч	$T_{ДС} = \left(\sum_{i=1}^N T_{iY}^{-2} \right)^{-1/2}$, ч
1	У1	42300	11900
2	У2	14100	
3	У3	112800	
4	У4	56400	
5	У5	28200	

Для расчета вероятности безотказной работы СПД ($R_{ДС}$) ВФ-методом необходимо оценить параметр формы DN -распределения для дублированного узла (V_Y) (табл. 5) по формуле (4), предполагая, что $V_0 = V_{ФСБ} = 1$.

Для расчета $R_{ДС}$ необходимо вычислить относительную наработку x_i для каждого дублированного узла при условии, что суммарная наработка системы, например, равна $t_n = 7000$ ч. По таблицам DN -распределения [8] для $V_Y = 0,7$ и x_i определяется вероятность отказа узла F_{iY} , откуда вероятность безотказной работы узла $R_{iY} = 1 - F_{iY}$ (табл. 5). При последовательном соединении дублированных узлов вероятность безотказной работы СПД $R_{ДС}$ вычисляется по известной формуле:

$$R_{ДС} = \prod_{i=1}^n R_{iY}. \quad (7)$$

Таблица 5 – Расчет вероятности безотказной работы дублированной системы

№ п/п	Обозначение узла	Средняя наработка до отказа T_{iY} , ч	$V_y = \frac{V_{ФСБ}}{\sqrt{2}}$ $V_{ФСБ} = 1$	$x_i = \frac{t_n}{T_{iY}}$, $t_n = 7000$ ч	F_{iY}	R_{iY}	$R_{ДС} = \prod_{i=1}^n R_{iY}$
1	У1	42300	0,7	0,17	0,00352	0,99648	0,74809
2	У2	14100		0,5	0,22855	0,77145	
3	У3	112800		0,06	0,00001	0,99999	
4	У4	56400		0,12	0,00026	0,99974	
5	У5	28200		0,25	0,02659	0,97341	

4. Двухканальная система с квазимостиковой структурой

Проектирование КМС начинается с декомпозиции последовательного канала (ПК) на равнонадежные ТЭЗ, на которых размещаются соответствующие ФСБ. Для вычисления надежности такого унифицированного ТЭЗ следует воспользоваться формулой (3), преобразовав ее к виду

$$T_i = T_{ПК} \sqrt{n} . \quad (8)$$

Результаты проектирования КМС из 5 узлов приведены в табл. 6.

Таблица 6 – Проектирование ФСБ КМС из 5 узлов

№ п/п	Обозначение узла	Средняя наработка до отказа ФСБ $T_i = T_{ПК} \sqrt{5}$, ч
1	ФСБ1	18932
2	ФСБ2	
3	ФСБ3	
4	ФСБ4	
5	ФСБ5	

Результаты расчета надежности равнонадежных дублированных узлов по формуле (5) приведены в табл. 7.

Таблица 7 – Расчет вероятности безотказной работы системы с КМС из 5 узлов

№ п/п	Обозначение узла	Средняя наработка до отказа узла $T_y = T_i \sqrt{2}$ ч	$x = \frac{t_n}{T_y}$ $t_n = 7000$ ч	F_y	R_y	$R_{КМС} = R_y^n$ $n = 5$
1	У1	26694	0,26	0,03139	0,96861	0,8526
2	У2					
3	У3					
4	У4					
5	У5					

Для расчета вероятности безотказной работы системы с КМС $R_{КМС}$ необходимо вычислить относительную наработку x для дублированного узла при условии, что сум-

марная наработка системы равна $t_n = 7000$ ч. По таблицам DN -распределения [8] для $V_y = 0,7$ и x определяем F_y , откуда $R_y = 1 - F_y$ (табл. 7). При последовательном соединении равнонадежных дублированных узлов вероятность безотказной работы КМС $R_{КМС}$ вычисляется по известной формуле:

$$R_{КМС} = R_y^n. \quad (9)$$

Результаты проектирования и расчета $R_{КМС}$ для системы с КМС из 10 узлов приведены в табл. 8, 9.

Таблица 8 – Проектирование ФСБ КМС из 10 узлов

№ п/п	Обозначение узла	Средняя наработка до отказа ФСБ $T_i = T_{ПК} \sqrt{10}$
1	ФСБ1	26708
2	ФСБ 2	
3	ФСБ 3	
4	ФСБ 4	
5	ФСБ 5	
6	ФСБ 6	
7	ФСБ 7	
8	ФСБ 8	
9	ФСБ 9	
10	ФСБ 10	

Таблица 9 – Расчет вероятности безотказной работы системы с КМС из 10 узлов

№ п/п	Обозначение узла	Средняя наработка до отказа узла $T_y = T_i \sqrt{2}$ ч	$x = \frac{t_n}{T_y}$, $t_n = 7000$ ч	F_y	R_y	$R_{КМС} = R_y^n$, $n = 10$
1	У1	37659	0,19	0,00683	0,99317	0,9338
2	У2					
3	У3					
4	У4					
5	У5					
6	У6					
7	У7					
8	У8					
9	У9					
10	У10					

5. Выводы

Анализ результатов расчета надежности систем ВФ-методом показывает:

– при одинаковом количестве узлов ($n = 5$) у обеих систем вероятность безотказной работы системы с КМС $R_{КМС} = 0,8526$ превышает вероятность безотказной работы системы с поблочным дублированием $R_{ДС} = 0,74809$ на 14%;

– при количестве узлов $n=10$ $R_{КМС}=0,9338$ превышает $R_{КМС}=0,8526$ системы с количеством узлов $n=5$ на 9,5 % и $R_{ДС}=0,74809$ системы с поблочным дублированием на 25 %.

При одинаковом уровне избыточности исследуемых двухканальных резервированных систем с поблочным дублированием и квазимостиковой структурой декомпозиция каналов на равнонадежные дублированные узлы в случае системы с КМС приводит к росту вероятности безотказной работы – к R -эффекту, как при одинаковом количестве узлов в рассматриваемых системах, так и с большим количеством узлов в случае системы с КМС произвольной сложности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федухин А.В. Анализ эффективности смешанного резервирования невосстанавливаемых систем. *Математичні машини і системи*. 2008. № 2. С. 137–146.
2. Федухин А.В., Сеспедес Гарсия П.Д. К вопросу о структурах отказоустойчивых компьютеров фирмы *Stratus Computer Inc.* *Математичні машини і системи*. 2018. № 4. С. 87–100.
3. Цнобиладзе М. Отказоустойчивые компьютерные системы: путь к максимальной эффективности. URL: <http://www.pcweek.ru/themes/detail.php?ID=45692>.
4. Федухин А.В., Пасько В.П. Моделирование надежности систем средствами пакета программ RELIABmod. *Математичні машини і системи*. 2011. № 4. С. 176–182.
5. Федухин А.В., Пасько В.П. Моделирование надежности систем. *Методи менеджмента качества*. 2012. № 3. С. 50–55.
6. Федухин А.В., Пасько В.П. К вопросу о моделировании надежности двухканального невосстанавливаемого вычислительного комплекса специального назначения. *Математичні машини і системи*. 2016. № 4. С. 142–145.
7. Федухин А.В., Сеспедес Гарсия Н.В., Муха Ар.А. К вопросу о надежности невосстанавливаемой системы с квазимостиковой структурой элементов. *Математичні машини і системи*. 2017. № 4. С. 160–168.
8. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. К.: Логос, 2002. 486 с.

Стаття надійшла до редакції 24.03.2020