УДК 621.3.019.3

А.В. ФЕДУХИН*, Н.В. СЕСПЕДЕС ГАРСИЯ*, Ар.А. МУХА*

К ВОПРОСУ О НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ С КВАЗИМОСТИКОВОЙ СТРУКТУРОЙ ЭЛЕМЕНТОВ

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

Анотація. *Стаття присвячена оцінці надійності квазімостикової структури методом аналітичного розрахунку, заснованого на класичних теоремах теорії ймовірностей. Наводиться порівняльна оцінка отриманих результатів з результатами статистичного моделювання та аналітичного розрахунку ВФ-методом.*
Ключові слова: *квазімостикова структура, декомпозиція двоканальної структури, надійність квазімостикової структури, високонадійні системи критичного застосування.*

Аннотация. *Статья посвящена оценке надежности квазимостиковой структуры методом аналитического расчета, основанного на классических теоремах теории вероятностей. Приводится сравнительная оценка полученных результатов с результатами статистического моделирования и аналитического расчета ВФ-методом.*
Ключевые слова: *квазимостиковая структура, декомпозиция двуканальной структуры, надежность квазимостиковой структуры, высоконадежные системы критического применения.*

Abstract. *The article is devoted to the estimation of the reliability of a quasi-bridge structure by the method of analytical calculation based on the classical theorems of probability theory. A comparative evaluation of the received results with the results of statistical modeling and analytical calculation by the probabilistic-physical method is given.*
Keywords: *kvazimostikova structure, decomposition of the two-channel structure, reliability of the kvazimostikova structure, highly reliable critical application systems.*

1. Введение

В [1] впервые была предложена двухканальная отказоустойчивая структура, названная впоследствии квазимостиковой, которая получила дальнейшее развитие в работах [2–5] и показала свое реальное превосходство над известной двухканальной структурой с горячим резервом.

Данный факт преимуществ квазимостиковой структуры подтверждается другим исследователем в [6] для похожей системы, названной им резервированной системой с дублированными подсистемами и детектором ошибок. При таком резервировании после каждого резервируемого элемента стоит детектор ошибок, фиксирующий несовпадение результатов работы основного и резервного элементов. В случае обнаружения несовпадения запускается диагностическая программа, определяющая, какой именно блок отказал, и исключающая его из работы. При этом указаны следующие преимущества такой структуры:

• значительное увеличение вероятности безотказной работы вычислительной системы;

• повышение ремонтопригодности вследствие возрастания диагностической точности в определении отказавшего элемента.

В последнее время преимущества квазимостиковой структуры [1] доказывались путем имитационного моделирования [2], статистического моделирования [3–5] и путем аналитического расчета ВФ-методом [7]. Все эти подходы основаны на гипотезе о диффузионном законе распределения (DN -распределении). Не требует доказательств тот факт, что использование любой теоретической модели надежности связано, в той или иной степени, с методическими ошибками, влияющими на точность результата. Несмотря на то, что DN - распределение как двухпараметрическая вероятностно-физическая модель имеет их минимальные значения [7], однако представляет особый теоретический интерес сравнение результатов оценки вероятности безотказной работы, полученной на основе параметрических методов, с результатами, полученными классическим методом, основанным на базовых теоремах теории вероятностей.

Цель исследований – оценка надежности квазимостиковой структуры методом аналитического расчета, основанного на классических теоремах теории вероятностей, сравнительная оценка полученных результатов с результатами статистического моделирования и аналитического расчета ВФ-методом.

2. Оценка надежности отказоустойчивых структур классическим методом

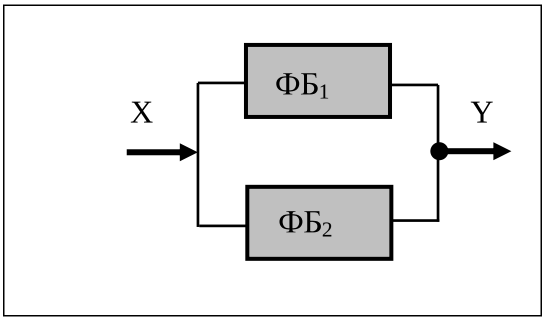

Рис. 1. Дублированная структура

Рассмотрим невосстанавливаемую двухканальную (дублированную) структуру из двух функциональных блоков ФБ$_1$ и ФБ$_2$ (рис. 1). При отказе одного из каналов система продолжает работу по другому, сохранившему работоспособность, каналу. Работу каналов контролирует блок контроля и реконфигурации (БКР), который в последующих расчетах считается абсолютно надежным и не показывается на рисунке.

Составим таблицу состояний дублированной структуры (табл. 1), которая включает три работоспособных состояния.

Таблица 1. Таблица состояний дублированной структуры

Обозначение работоспособного состояния структуры A_i	Отказавшие ФБ за время t	Безотказно проработавшие ФБ в течение времени t
A_1	-	1, 2
A_2	1	2
A_3	2	1

Воспользуемся теоремой сложения вероятностей и запишем выражение для вероятности безотказной работы:

$$R(t) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3)\,. \tag{1}$$

Распишем вероятности работоспособных событий:

$$P(A_1) = R_1 \cdot R_2\,, \tag{2}$$

$$P(A_2) = F_1 \cdot R_2 = (1 - R_1) \cdot R_2\,,$$

$$P(A_3) = F_2 \cdot R_1 = (1 - R_2) \cdot R_1\,.$$

При равнонадежных ФБ:

$$P(A_1) = R^2{}_{ФБ}, \tag{3}$$

$$P(A_2) = (1 - R_{ФБ}) \cdot R_{ФБ},$$

$$P(A_3) = (1 - R_{ФБ}) \cdot R_{ФБ}.$$

Подставив (3) в (1), получим вероятность безотказной работы структуры:

$$R_C(t) = R^2_{ФБ} + (1 - R_{ФБ}) \cdot R_{ФБ} + (1 - R_{ФБ}) \cdot R_{ФБ} = 2R_{ФБ} - R^2_{ФБ}. \tag{4}$$

Рассмотрим следующий пример.

Пример 1. Пусть $T_{ФБ}$=1000 ч. При справедливости диффузионного немонотонного закона распределения (DN-распределения) для t=500 ч и $V_{ФБ}$=0,75 по таблицам [7] вычислим $R_{ФБ}$=0,7452, откуда по (4) получаем $R_C(t) = 2R_{ФБ} - R^2_{ФБ}$=0,9351.

С целью повышения безотказности и эксплуатационной готовности дублированной структуры предлагается ее декомпозиция, при которой каждый ФБ разбивается на n функциональных субблоков (ФСБ), которые с помощью БКР образуют n дублированных узлов (рис. 2). В последующих расчетах БКР считается абсолютно надежным. Если ФБ разбиваются на условно равнонадежные ФСБ, то средняя наработка до отказа такого ФСБ может быть ориентировочно вычислена по формуле: $T_{ФСБ} = \sqrt{n} \cdot T_{ФБ}$ [7]. Такая новая структура получила название «квазимостиковой» [2].

Рассмотрим невосстанавливаемую квазимостиковую структуру из 2-х узлов (рис. 2).

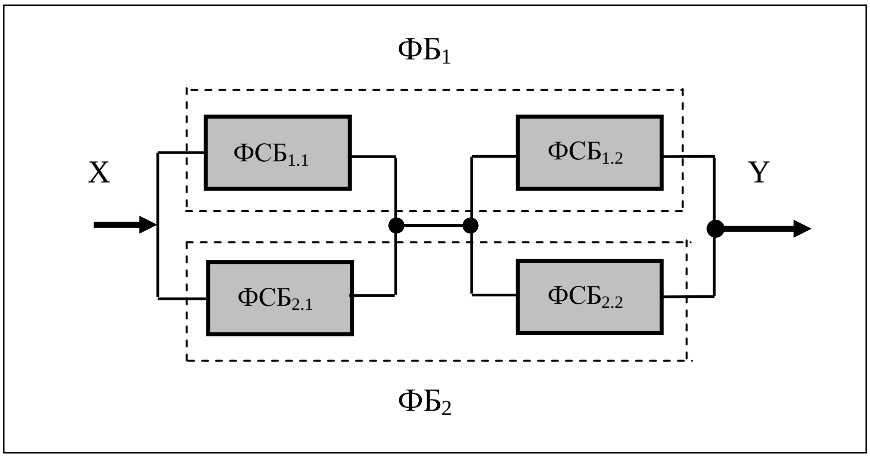

Рис. 2. Квазимостиковая структура из 2-х узлов

Составим таблицу состояний квазимостиковой структуры из 2-х узлов (табл. 2), которая включает девять работоспособных состояний.

Таблица 2. Таблица состояний квазимостиковой структуры из 2-х узлов

Обозначение работоспособного состояния структуры A_i	Отказавшие ФБ за время t	Безотказно проработавшие ФБ в течение времени t
A_1	-	1.1, 1.2, 2.1, 2.2
A_2	1.1	1.2, 2.1, 2.2
A_3	2.1	1.1, 1.2, 2.2
A_4	1.2	1.1, 2.1, 2.2

Продолж. табл. 2

A_5	2.2	1.1, 1.2, 2.1
A_6	1.1, 1.2	2.1, 2.2
A_7	1.1, 2.2	1.2, 2.1
A_8	1.2, 2.1	1.1, 2.2
A_9	2.1, 2.2	1.1, 1.2

Воспользуемся, как и раньше, теоремой сложения вероятностей и запишем выражение для вероятности безотказной работы:

$$R(t) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) + P(A_4) + P(A_5) + P(A_6) + P(A_7) + P(A_8) + P(A_9). \quad (5)$$

Распишем вероятности работоспособных событий:

$$P(A_1) = R_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.2}, \quad (6)$$

$$P(A_2) = F_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{1.1}) \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_3) = F_{2.1} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{2.1}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_4) = F_{1.2} \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{1.2}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_5) = F_{2.2} \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2} = (1 - R_{2.2}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2},$$

$$P(A_6) = F_{1.1} \cdot F_{1.2} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{1.1}) \cdot (1 - R_{1.2}) \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_7) = F_{1.1} \cdot F_{2.2} \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2} = (1 - R_{1.1}) \cdot (1 - R_{2.2}) \cdot R_{2.1} \cdot R_{1.2},$$

$$P(A_8) = F_{2.1} \cdot F_{1.2} \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.2} = (1 - R_{2.1}) \cdot (1 - R_{1.2}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{2.2},$$

$$P(A_9) = F_{2.1} \cdot F_{2.2} \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2} = (1 - R_{2.1}) \cdot (1 - R_{2.2}) \cdot R_{1.1} \cdot R_{1.2}.$$

При равнонадежных ФСБ:

$$P(A_1) = R^4{}_{ФСБ}, \quad (7)$$

$$P(A_2) = (1 - R_{ФСБ}) \cdot R^3{}_{ФСБ},$$

$$P(A_3) = (1 - R_{ФСБ}) \cdot R^3{}_{ФСБ},$$

$$P(A_4) = (1 - R_{ФСБ}) \cdot R^3{}_{ФСБ},$$

$$P(A_5) = (1 - R_{ФСБ}) \cdot R^3{}_{ФСБ},$$

$$P(A_6) = (1 - R_{ФСБ})^2 \cdot R^2{}_{ФСБ},$$

$$P(A_7) = (1 - R_{ФСБ})^2 \cdot R^2{}_{ФСБ},$$

$$P(A_8) = (1 - R_{ФСБ})^2 \cdot R^2{}_{ФСБ},$$

$$P(A_9) = (1 - R_{ФСБ})^2 \cdot R^2{}_{ФСБ}.$$

Подставив (7) в (5), получим вероятность безотказной работы структуры:

$$R_C(t) = R^4_{ФСБ} + 4\cdot(1-R_{ФСБ})\cdot R^3{}_{ФСБ} + 4\cdot(1-R_{ФСБ})^2\cdot R^2{}_{ФСБ}. \tag{8}$$

Если при декомпозиции ФБ не удается его разделить на абсолютно равнонадежные ФСБ, то есть имеет место такая практическая ситуация, при которой равнонадежны ФСБ в первой паре $ФСБ_{1.1}$ и $ФСБ_{2.1}$, а $ФСБ_{1.2}$ и $ФСБ_{2.2}$ также равнонадежны, но их уровень надежности отличается от уровня надежности ФСБ первой пары. В этом случае при попарной равнонадежности ФСБ каждого узла заменим $R_{1.1}$ и $R_{2.1}$ на R_1 и $R_{1.2}$ и $R_{2.2}$ на R_2 и получим следующие выражения для вероятностей событий:

$$P(A_1) = R_1^2\cdot R_2^2, \tag{9}$$

$$P(A_2) = P(A_3) = (1-R_1)\cdot R_1\cdot R_2^2,$$

$$P(A_4) = P(A_5) = (1-R_2)\cdot R_2\cdot R_1^2,$$

$$P(A_6) = P(A_7) = P(A_8) = P(A_9) = (1-R_1)\cdot(1-R_2)\cdot R_1\cdot R_2.$$

Подставив (9) в (5), получим вероятность безотказной работы структуры:

$$R_C(t) = R_1^2\cdot R_2^2 + 2\cdot(1-R_1)\cdot R_1\cdot R_2^2 + 2\cdot(1-R_2)\cdot R_2\cdot R_1^2 + 4\cdot(1-R_1)\cdot(1-R_2)\cdot R_1\cdot R_2. \tag{10}$$

Рассмотрим следующий пример.

Пример 2. Пусть ФСБ равнонадежны, и $T_{ФСБ} = \sqrt{n}\cdot T_{ФБ}$, где $n = 2$ – количество ФСБ в канале, $T_{ФБ}$=1000 ч, откуда $T_{ФСБ}$=1414 ч. При справедливости диффузионного немонотонного закона распределения (DN-распределения) для $t = 500$ ч и $V_{ФСБ}$=0,75 по таблицам [7] вычислим $R_{ФСБ}$=0,8875, откуда

$$R_C(t) = R^4_{ФСБ} + 4\cdot(1-R_{ФСБ})\cdot R^3{}_{ФСБ} + 4\cdot(1-R_{ФСБ})^2\cdot R^2{}_{ФСБ}\text{=0,9749.}$$

Проиллюстрируем работу формулы (10) для случая, когда $T_{ФСБ1.1} = T_{ФСБ2.1} = 1200$ ч и $T_{ФСБ1.2} = T_{ФСБ2.2} = 1600$ ч, остальные исходные данные t и $V_{ФСБ}$ возьмем из примера 2. Для $t = 500\,ч$ и $V_{ФСБ}$=0,75 по таблицам [7] вычислим R_1=0,8226 и R_2=0,9209, откуда

$$R_C(t) = R_1^2\cdot R_2^2 + 2\cdot(1-R_1)\cdot R_1\cdot R_2^2 + 2\cdot(1-R_2)\cdot R_2\cdot R_1^2 + 4\cdot(1-R_1)\cdot(1-R_2)\cdot R_1\cdot R_2 = 0{,}9625.$$

Рассмотрим невосстанавливаемую квазимостиковую структуру из 3-х узлов (рис. 3).

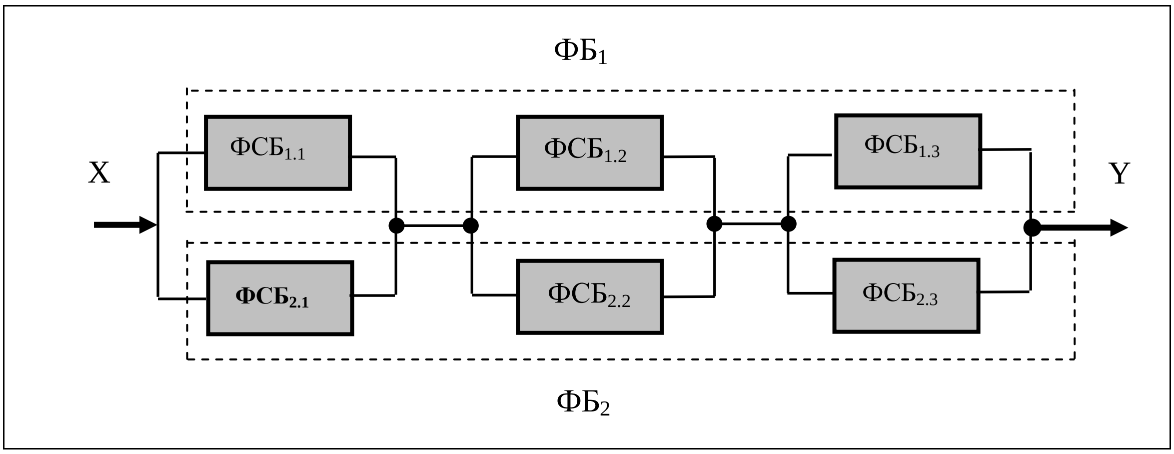

Рис. 3. Квазимостиковая структура из 3-х узлов

Составим таблицу состояний квазимостиковой структуры из 3-х узлов (табл. 3), которая включает 25 работоспособных состояний.

Таблица 3. Таблица состояний квазимостиковой структуры из 3-х узлов

Обозначение работоспособного состояния структуры A_i	Отказавшие ФБ за время t	Безотказно проработавшие ФБ в течение времени t
A_1	-	1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3
A_2	1.1	1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3
A_3	2.1	1.1, 1.2, 1.3, 2.2, 2.3
A_4	1.2	1.1, 1.3, 2.1, 2.2, 2.3
A_5	2.2	1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.3
A_6	1.3	1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 2.3
A_7	2.3	1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2
A_8	1.1, 1.2	1.3, 2.1, 2.2, 2.3
A_9	1.1, 1.3	1.2, 2.1, 2.2, 2.3
A_{10}	1.1, 2.2	1.2, 1.3, 2.1, 2.3
A_{11}	1.1, 2.3	1.2, 1.3, 2.1, 2.2,
A_{12}	1.2, 1.3	1.1, 2.1, 2.2, 2.3
A_{13}	1.2, 2.1	1.1, 1.3, 2.2, 2.3
A_{14}	1.2, 2.3	1.1, 1.3, 2.1, 2.2,
A_{15}	1.3, 2.1	1.1, 1.2, 2.2, 2.3
A_{16}	1.3,2.2	1.1, 1.2, 2.1, 2.3
A_{17}	2.1, 2.2	1.1, 1.2, 1.3, 2.3
A_{18}	2.1, 2.3	1.1, 1.2, 1.3, 2.2
A_{19}	2.2, 2.3	1.1, 1.2, 1.3, 2.1
A_{20}	1.1, 1.2, 1.3	2.1, 2.2, 2.3
A_{21}	1.1, 1.2, 2.3	1.3, 2.1, 2.2
A_{22}	1.1, 1.3, 2.2	1.2, 2.1, 2.3
A_{23}	2.1, 2.2, 2.3	1.1, 1.2, 1.3
A_{24}	2.1, 2.2, 1.3	1.1, 1.2, 2.3
A_{25}	2.1, 2.3, 1.2	1.1, 1.3, 2.2

Воспользуемся, как и раньше, теоремой сложения вероятностей и запишем выражение для вероятности безотказной работы:

$$R(t) = P(A_1) + P(A_2) + ... + P(A_{25}) . \qquad (11)$$

Распишем вероятности работоспособных событий:

$$P(A_1) = R_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3} , \qquad (12)$$

$$P(A_2) = F_{1.1} \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3} = (1 - R_{1.1}) \cdot R_{1.2} \cdot R_{1.3} \cdot R_{2.1} \cdot R_{2.2} \cdot R_{2.3} ,$$

$$P(A_3)=F_{2.1}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3}=(1-R_{2.1})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_4)=F_{1.2}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3}=(1-R_{1.2})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_5)=F_{2.2}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.3}=(1-R_{2.2})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_6)=F_{1.3}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3}=(1-R_{1.3})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_7)=F_{2.3}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}=(1-R_{2.3})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2},$$

$$P(A_8)=F_{1.1}\cdot F_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3}=(1-R_{1.1})\cdot(1-R_{1.2})\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_9)=F_{1.1}\cdot F_{1.3}\cdot R_{1.2}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3}=(1-R_{1.1})\cdot(1-R_{1.3})\cdot R_{1.2}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{10})=F_{1.1}\cdot F_{2.2}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.3}=(1-R_{1.1})\cdot(1-R_{2.2})\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{11})=F_{1.1}\cdot F_{2.3}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}=(1-R_{1.1})\cdot(1-R_{2.3})\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2},$$

$$P(A_{12})=F_{1.2}\cdot F_{1.3}\cdot R_{1.1}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3}=(1-R_{1.2})\cdot(1-R_{1.3})\cdot R_{1.1}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{13})=F_{1.2}\cdot F_{2.1}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3}=(1-R_{1.2})\cdot(1-R_{2.1})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{14})=F_{1.2}\cdot F_{2.3}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}=(1-R_{1.2})\cdot(1-R_{2.3})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2},$$

$$P(A_{15})=F_{1.3}\cdot F_{2.1}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3}=(1-R_{1.3})\cdot(1-R_{2.1})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{16})=F_{1.3}\cdot F_{2.2}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.3}=(1-R_{1.3})\cdot(1-R_{2.2})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{17})=F_{2.1}\cdot F_{2.2}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.3}=(1-R_{2.1})\cdot(1-R_{2.2})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{18})=F_{2.1}\cdot F_{2.3}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.2}=(1-R_{2.1})\cdot(1-R_{2.3})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.2},$$

$$P(A_{19})=F_{2.2}\cdot F_{2.3}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}=(1-R_{2.2})\cdot(1-R_{2.3})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1},$$

$$P(A_{20})=F_{1.1}\cdot F_{1.2}\cdot F_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3}=(1-R_{1.1})\cdot(1-R_{1.2})\cdot(1-R_{1.3})\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{21})=F_{1.1}\cdot F_{1.2}\cdot F_{2.3}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2}=(1-R_{1.1})\cdot(1-R_{1.2})\cdot(1-R_{2.3})\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.2},$$

$$P(A_{22})=F_{1.1}\cdot F_{1.3}\cdot F_{2.2}\cdot R_{1.2}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.3}=(1-R_{1.1})\cdot(1-R_{1.3})\cdot(1-R_{2.2})\cdot R_{1.2}\cdot R_{2.1}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{23})=F_{2.1}\cdot F_{2.2}\cdot F_{2.3}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3}=(1-R_{2.1})\cdot(1-R_{2.2})\cdot(1-R_{2.3})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{1.3},$$

$$P(A_{24})=F_{2.1}\cdot F_{2.2}\cdot F_{1.3}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{2.3}=(1-R_{2.1})\cdot(1-R_{2.2})\cdot(1-R_{1.3})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.2}\cdot R_{2.3},$$

$$P(A_{25})=F_{2.1}\cdot F_{2.3}\cdot F_{1.2}\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.2}=(1-R_{2.1})\cdot(1-R_{2.3})\cdot(1-R_{1.2})\cdot R_{1.1}\cdot R_{1.3}\cdot R_{2.2}.$$

При равнонадежных ФСБ:

$$P(A_1)=R^6{}_{ФСБ},\tag{13}$$

$$P(A_2)=P(A_3)=P(A_4)=P(A_5)=P(A_6)=P(A_7)=(1-R_{ФСБ})\cdot R^5{}_{ФСБ},$$

$$P(A_8)=P(A_9)=P(A_{10})=P(A_{11})=P(A_{12})=P(A_{13})=P(A_{14})=$$
$$=P(A_{15})=P(A_{16})=P(A_{17})=P(A_{18})=P(A_{19})=(1-R_{ФСБ})^2\cdot R^4{}_{ФСБ},$$

$$P(A_{20})=P(A_{21})=P(A_{22})=P(A_{23})=P(A_{24})=P(A_{25})=(1-R_{ФСБ})^3\cdot R^3{}_{ФСБ}.$$

Подставим (13) в (11), получим вероятность безотказной работы структуры:

$$R_C(t) = R^6_{ФСБ} + 6 \cdot (1 - R_{ФСБ}) \cdot R^5{}_{ФСБ} + 12 \cdot (1 - R_{ФСБ})^2 \cdot R^4{}_{ФСБ} + 6 \cdot (1 - R_{ФСБ})^3 \cdot R^3{}_{ФСБ}. \quad (14)$$

Рассмотрим следующий пример.

Пример 3. Пусть $T_{ФСБ} = \sqrt{n} \cdot T_{ФБ}$, где $n = 3$ – количество ФСБ в канале, $T_{ФБ}$=1000 ч, откуда $T_{ФСБ}$=1732ч. При справедливости диффузионного немонотонного закона распределения (DN-распределения) для t=500ч и $V_{ФСБ}$=0,75 по таблицам [7] вычислим $R_{ФСБ}$=0,9361, откуда

$$R_C(t) = R^6_{ФСБ} + 6 \cdot (1 - R_{ФСБ}) \cdot R^5{}_{ФСБ} + 12 \cdot (1 - R_{ФСБ})^2 \cdot R^4{}_{ФСБ} + 6 \cdot (1 - R_{ФСБ})^3 \cdot R^3{}_{ФСБ} = 0,9874.$$

3. Анализ результатов

Проведем сравнение полученных результатов аналитического расчета надежности квазимостиковой структуры классическим методом с результатами статистического моделирования и аналитического расчета ВФ-методом [3,5] (табл. 4–6).

Таблица 4. Результаты моделирования надежности квазимостиковой структуры методом «слабого звена»

Количество узлов	Средняя наработка до отказа системы, $\hat{T}_C$	Коэффициент вариации наработки до отказа системы, $\hat{V}_C$	Вероятность безотказной работы системы, $\hat{R}_C$
1	1375	0,595	0,9414
2	1329	0,476	0,9741
3	1368	0,416	0,9875

Таблица 5. Результаты аналитического расчета надежности квазимостиковой структуры ВФ-методом

Количество узлов	Средняя наработка до отказа системы, $\tilde{T}_C$	Коэффициент вариации наработки до отказа системы, $\hat{V}_C$	Вероятность безотказной работы системы, $\tilde{R}_C$
1	1420	0,518	0,9731
2	1417	0,523	0,9714
3	1418	0,530	0,9696

Таблица 6. Результаты аналитического расчета надежности квазимостиковой структуры классическим методом

Количество узлов	Вероятность безотказной работы системы, $\tilde{R}_C$	Относительная ошибка моделирования δ_1,%	Относительная ошибка расчета ВФ-методом δ_2,%
1	0,9351	0,6	4,0
2	0,9749	0,08	0,3
3	0,9874	0,01	1,8

Статистическое моделирование и аналитический расчет классическим методом убедительно доказывают факт увеличения вероятности безотказной невосстанавливаемой квазимостиковой структуры с ростом количества узлов. Расчет вероятности безотказной работы ВФ-методом показывает отсутствие какой-либо зависимости данной структуры от количества узлов. Анализ величины относительной ошибки моделирования показал высокую адекватность результатов моделирования с помощью специально разработанного пакета программ RELIABmod [3, 5], дающего относительную ошибку не более 0,6%. Относительная ошибка ВФ-метода аналитического расчета также не велика и находится в допустимых пределах (не более 4%).

4. Заключение

Результаты аналитического расчета надежности невосстанавливаемой квазимостиковой структуры убедительно подтвердили высокую эффективность данной отказоустойчивой структуры, позволяющей проектировать на ее основе высоконадежные системы критического применения.

Квазимостиковая структура характеризуется более высоким уровнем отказоустойчивости и, как следствие, живучести, так как имеет значительно большее количество работоспособных состояний, чем простая дублированная структура. Она также способна к автоматической реконфигурации в одноканальную структуру без дополнительного вмешательства и изменения функции восстанавливающего органа (ВО).

Кроме того, с ростом количества узлов структуры уменьшается сложность ФСБ, из которых состоит узел, что упрощает программную и/или техническую реализацию схемы внутреннего контроля (СВК), задачей которой является обнаружение неисправностей не только в контролируемом вычислительном канале, но и своих собственных неисправностей. Увеличение количества узлов также повышает точность контроля и диагностики неисправностей структуры и, как следствие, приводит к уменьшению времени восстановления и возрастанию показателей надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федухин А.В. К вопросу об аппаратной реализации избыточных структур: резервированная двухканальная система с реконфигурацией / А.В. Федухин, Ар.А. Муха // Математичні машини і системи. – 2010. – № 4. – С. 156 – 159.
2. Федухин А.В. Имитационное моделирование отказоустойчивой двухканальной системы в интегрированной инструментальной среде Matlab Simulink / А.В. Федухин, Ар.А. Муха // Математичні машини і системи. – 2011. – № 2. – С. 178 – 181.
3. Федухин А.В. Моделирование надежности систем / А.В. Федухин, В.П. Пасько // Методы менеджмента качества. – 2012. – № 3. – С. 50 – 55.
4. Федухин А.В. Моделирование надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры с учетом тренда параметров надежности составных частей / А.В. Федухин, В.П. Пасько, Ар.А. Муха // Математичні машини і системи. – 2016. – № 1. – С. 158 – 167.
5. Федухин А.В. К вопросу о моделировании надежности двухканального невосстанавливаемого вычислительного комплекса специального назначения / А.В. Федухин, В.П. Пасько // Математичні машини і системи. – 2016. – № 4. – С. 142 – 145.
6. Повышение надежности за счет резервирования оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://all-ht.ru/inf/systems/p_0_5.html.
7. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надёжности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.

Стаття надійшла до редакції 29.09.2017