



УДК 621.3.019.3

А.В. ФЕДУХИН*, В.П. ПАСЬКО**

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ КВАЗИМОСТИКОВОЙ СТРУКТУРЫ С УЧЕТОМ ТРЕНДА ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ

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

**АЕС «Киевоблэнерго», Киев, Украина

Анотація. Розглянуті питання моделювання надійності відновлювальної квазімостикової структури з урахуванням тренду параметрів надійності складових частин засобами пакета програм RELIABmod v.3.0. Наводяться залежності показників надійності структури від часу відновлення і кількості вузлів.

Ключові слова: квазімостикова структура, алгоритм моделювання, тренд параметрів надійності.

Аннотация. Рассмотрены вопросы моделирования надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры с учетом тренда параметров надежности составных частей средствами пакета программ RELIABmod v.3.0. Приводятся зависимости показателей надежности структуры от времени восстановления и количества узлов.

Ключевые слова: квазимостиковая структура, алгоритм моделирования, тренд параметров надежности.

Abstract. Problems of modeling reliability of restored quasi-bridged structure taking into account the trend of reliability parameters of the components by means of RELIABmod v.3.0 software package were regarded. The dependences of the reliability indices structure on recovery time and the number of nodes were introduced.

Keywords: quasi-bridged structure, modeling algorithm, the trend of reliability parameters.

1. Введение

Повышенная безотказность и эксплуатационная готовность квазимостиковой структуры [1, 2] достигается ее декомпозицией, при которой каждый вычислительный канал (ЭВМ) разбивается на n микроконтроллеров (далее по тексту – элементов структуры Э), которые с помощью схем реконфигурации (СР) образуют n дублированных узлов. Анализ работоспособности ЭВМ осуществляется самопроверяемой схемой внутреннего контроля (ССВК). Выходной контроль работоспособности всей структуры осуществляется безопасной схемой сравнения (БСС).

Если ЭВМ разбивается на условно равнонадежные элементы Э (например, ЭВМ1.1 и ЭВМ1.2, ЭВМ2.1 и ЭВМ2.2), то средняя наработка до отказа такого Э ориентировочно может быть оценена по формуле [3] $T_{\text{Э}} = \sqrt{n} \cdot T_{\text{ЭВМ}}$. Схема декомпозированной структуры, состоящей из двух узлов, приведена на рис. 1.

Визуально она напоминает мостиковую структуру ССН-4 [3], в которой, вместо центрального типового элемента структуры, установлены две СР (по одной в каждый канал), обеспечивающие перекрестные связи между каналами с целью реконфигурации структуры в случае выхода из строя соответствующего Э канала. Такая структура и получила название “квазимостиковой”.

В общем виде структурная схема надежности (ССН) квазимостиковой структуры

имеет двухканальную (дублированную) структуру, изображенную на рис. 2, где ФСБ – функциональный субблок (результат разбиения ФБ (ЭВМ) на условно равнонадежные части), БКР – блок контроля и реконфигурации, включающий в себя схемы ССВК и СР.

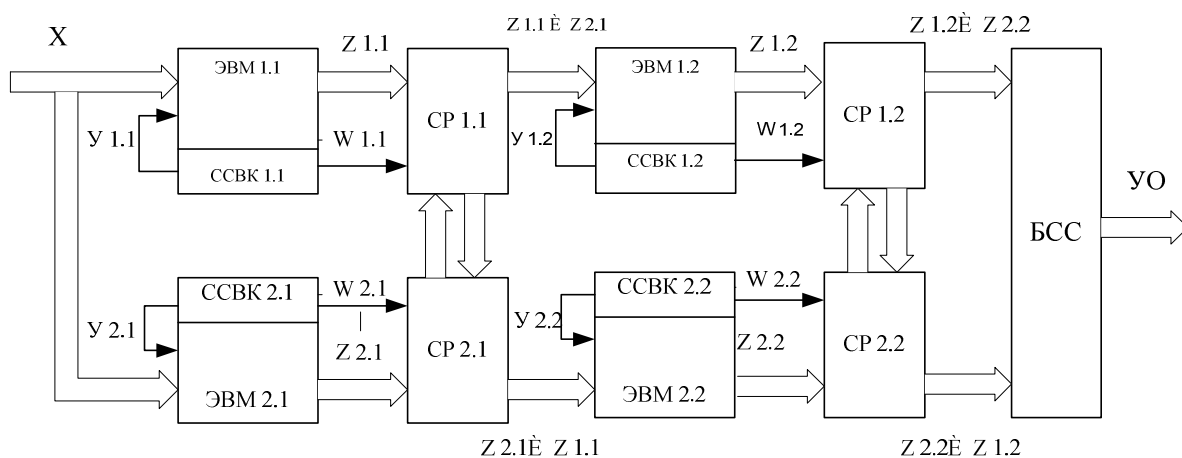


Рис. 1. Самопроверяемая квазимостиковая структура

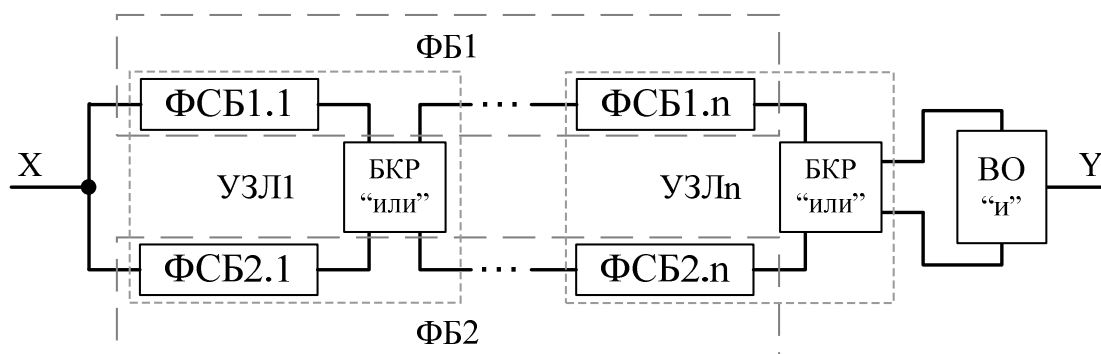


Рис. 2. ССН квазимостиковой структуры

Примечание. На практике не требуется точное разбиение ФБ на равнонадежные ФСБ, достаточно разбивать ФБ на функционально обособленные ФСБ с приблизительно одинаковой надежностью, реализованные, например, на ПЛИС-системах или микроконтроллерах.

2. Моделирование надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры

Для статистического моделирования надежности сложных систем используется специально разработанный пакет программ – RELIABmod v.3.0 [6]. Пакет программ позволяет производить прогнозирование надежности объектов, имеющих самые разнообразные структурные схемы надежности (ССН).

Блок-схема алгоритма моделирования надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры приведена на рис. 3.

3. Аналитическое описание алгоритма моделирования и расчета

Аналитические описания алгоритмов статистического моделирования и расчета ВФ-методом [3] приведены ниже.

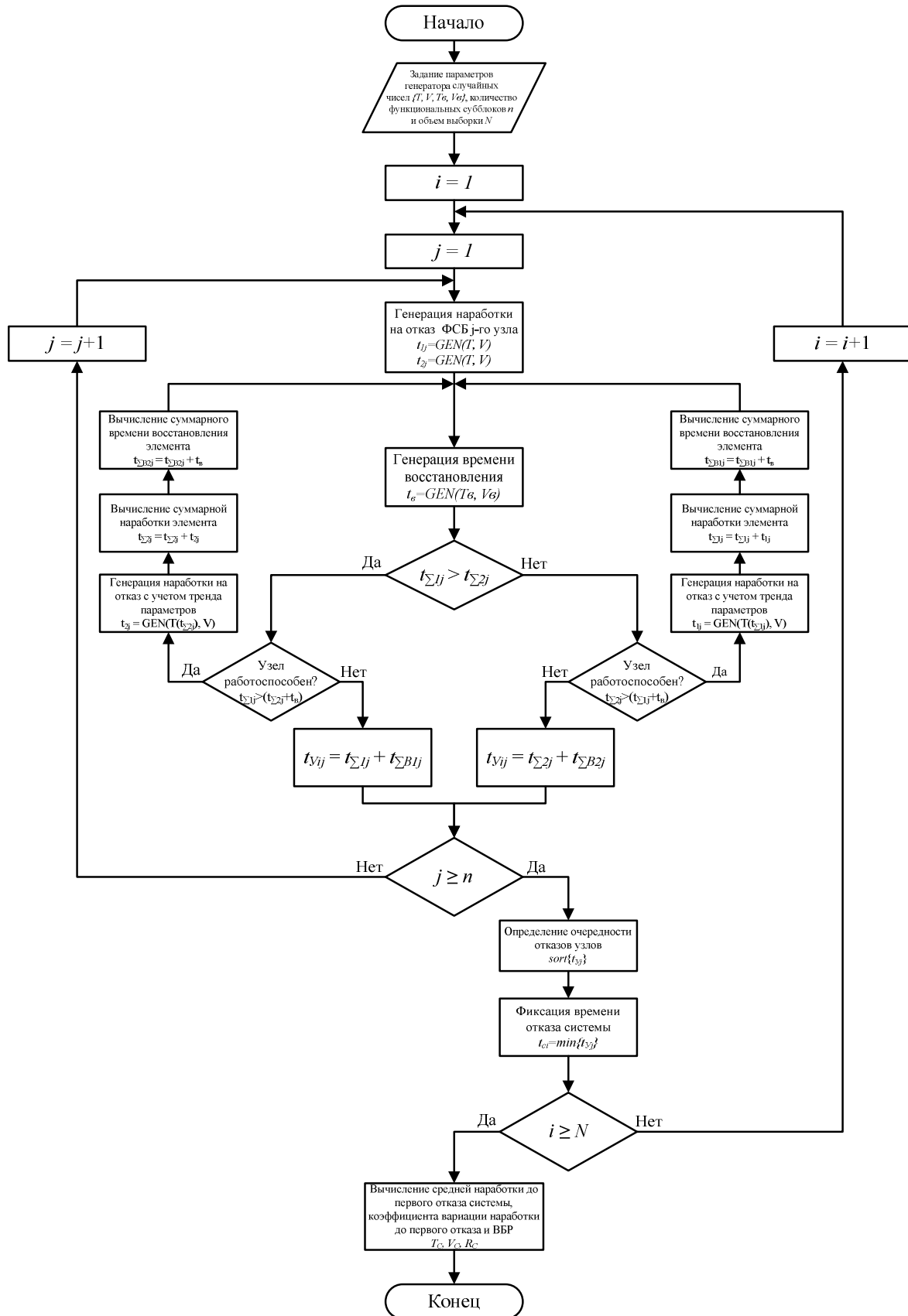


Рис. 3. Блок-схема алгоритма моделирования надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры

В качестве теоретической модели надежности всех компонентов системы используется диффузионное немонотонное распределение (DN-распределение) наработки до отказа (на отказ). Для прозрачности анализа результатов моделирования собственно квазимостиковой структуры принимается, что устройства БКР и ВО абсолютно надежны и их отказы не участвуют в обобщенном потоке отказов структуры в целом.

Моделирование надежности структуры (наработки до первого отказа и вероятности безотказной работы ВБР) начинается с генерации случайных наработок на отказ всех Э, входящих в состав структуры и осуществляется по следующему алгоритму:

1. Генерация наработок на отказ всех Э системы с учетом двух каналов 1 и 2:

$$\hat{t}_{\Sigma ij1} = DN_GEN(T_{\Sigma j}, V_{\Sigma j}),$$

$$\hat{t}_{\Sigma ij2} = DN_GEN(T_{\Sigma j}, V_{\Sigma j}),$$

где $\hat{t}_{\Sigma ij1}$, $\hat{t}_{\Sigma ij2}$ – случайные i -е наработки на отказ j -го типа элементов 1 и 2 каналов;

$i = 1, 2, \dots, N$ – объем выборки (количество статистических экспериментов со структурой системы);

$j = 1, 2, \dots, n$ – количество типов узлов в квазимостиковой структуре;

$DN_GEN(\bullet)$ – генератор случайных чисел, распределенных в соответствии с DN-распределением;

$T_{\Sigma j}$, $V_{\Sigma j}$ – параметры генератора, соответственно, априорные значения средней наработки на отказ и коэффициента вариации наработки на отказ элемента j -го типа.

2. Анализ наработок на отказ Э двух каналов и определение наработки до первого отказа системы \hat{t}_{Ci} . Отказ системы наступает в случае отказа любого из n узлов, и время отказа системы определяется по минимальному значению \hat{t}_{vij} . Так как узлы дублированные, то время отказа узла \hat{t}_{vij} определяется по максимальному значению из $\hat{t}_{\Sigma ij1}$ и $\hat{t}_{\Sigma ij2}$ с учетом времени восстановления:

- определение очередности наработок (вариационного ряда) на отказ элементов двух каналов;

- наработка узла вычисляется по формуле

$$t_{vij} = t_{yij} + \max(t_{\Sigma ij1} : t_{\Sigma ij2});$$

- генерация времени восстановления элемента, который отказал первым:

$$t_{Bij} = DN_GEN(T_{Bj}, V_{Bj});$$

- если время восстановления элемента меньше, чем наработка на отказ дублирующего элемента, то отказа узла не происходит, и по окончании времени восстановления вновь подключается отказавший элемент. Так как в процессе эксплуатации надежность восстанавливаемых Э уменьшается, то для приближенной оценки величины их средней наработки на отказ в зависимости от времени виртуального функционирования используется формула учета тренда параметров надежности [4, 6]:

$$T(t_{\Sigma ij}) = T \left\{ 0,05 + 0,95 \exp \left[\frac{(t_{\Sigma ij} - T)}{(5 \cdot 10^5 - T)} \cdot (0,05 + \ln(T)^{-1}) \right] \right\}.$$

После этого генерируется следующий отказ Э уже с новыми параметрами его надежности:

$$t_{\text{Э}ij} = DN_GEN(T(t_{\Sigma\text{Э}ij}), V);$$

- вычисление суммарной наработки элемента:

$$t_{\Sigma\text{Э}ij} = t_{\Sigma\text{Э}ij} + t_{\text{Э}ij};$$

- вычисление суммарного времени восстановления элемента:

$$t_{\Sigma B\text{Э}ij} = t_{\Sigma B\text{Э}ij} + t_{Bij};$$

- построение вариационного ряда наработок на отказ;
- если время восстановления элемента больше, чем наработка на отказ дублирующего элемента, то фиксируется отказ узла:

$$t_{vij} = \max[(t_{\Sigma\text{Э}ij1} + t_{\Sigma B\text{Э}ij1}) : (t_{\Sigma\text{Э}ij2} + t_{\Sigma B\text{Э}ij2})].$$

3. Вычисление средней наработки до первого отказа системы:

$$\hat{T}_C = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{t}_{ci}}{N}.$$

4. Вычисление коэффициента вариации наработки до первого отказа системы:

$$\hat{V}_C = \frac{\sqrt{\hat{D}_{t_{ci}}}}{\hat{T}_C},$$

где $\hat{D}_{t_{ci}}$ – дисперсия наработки до первого отказа системы.

По результатам моделирования дополнительно вычисляются следующие характеристики надежности структуры.

5. Анализ наработок до первого отказа узлов \hat{t}_{vij} и определение средних наработок до первого отказа каждого типа узла:

$$\hat{T}_{vj} = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{t}_{vij}}{N}.$$

6. Определение коэффициентов вариации наработки до первого отказа каждого типа узла:

$$\hat{V}_{vj} = \frac{\sqrt{\hat{D}_{t_{vij}}}}{\hat{T}_{vj}}.$$

7. Определение ВБР системы:

$$\hat{R}_C = R_{DN}(\hat{T}_C, \hat{V}_C, t_H).$$

Расчет ВФ-методом по данным, полученным в процессе моделирования

1. Определение средней наработки до первого отказа системы по данным моделирования надежности узлов:

$$\tilde{T}_C = \left(\sqrt{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\hat{T}_{y_j}^2}} \right)^{-1},$$

где n – количество узлов в последовательной структуре системы.

2. Определение коэффициента вариации наработки до первого отказа системы, состоящей из последовательного соединения узлов:

$$\tilde{V}_C = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\hat{V}_{y_j}^2 / \hat{T}_{y_j}^2)}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\hat{T}_{y_j}^2}}}.$$

3. Определение ВБР системы:

$$\tilde{R}_C = R_{DN}(\tilde{T}_C, \tilde{V}_C, t_H).$$

4. Результаты моделирования надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры

В качестве примера рассмотрим результаты статистического моделирования и аналитического расчета ВФ-методом восстанавливаемой квазимостиковой структуры с параметрами $T_{\Phi B1} = T_{\Phi B2} = 1000$ ч (рис. 2). При декомпозиции структуры на равнонадежные узлы средняя наработка на отказ элемента определялась по формуле $T_{\Phi} = \sqrt{n} \cdot T_{\Phi B}$. Исходные значения коэффициентов вариации наработки на отказ неизбыточных ФБ и Э принимались равными $V_{\Phi B} = V_{\Phi} = 0,75$. Параметры восстановления: среднее время восстановления берется из ряда $T_B = \{10; 5; 2; 1; 0,5\}$ ч, коэффициент вариации времени восстановления $V_B = 0,75$. Оценка вероятности безотказной работы элементов, узлов и структуры в целом осуществлялась на момент суммарной наработки $t_H = 25000$ ч (порядка 3 лет непрерывной эксплуатации).

Результаты статистического моделирования и аналитического расчета надежности квазимостиковой структуры приведены в табл. 1–2.

Таблица 1. Результаты моделирования надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры методом "слабого звена"

Количество узлов	Характеристика надежности	Время восстановления, ч				
		10	5	2	1	0,5
1	\tilde{T}_C	28 596	42 784	65 299	89 505	114 820
	\tilde{V}_C	0,6870	0,6013	0,5410	0,4643	0,3635
	\tilde{R}_C	0,455555	0,745469	0,950612	0,997350	0,999997
2	\tilde{T}_C	28 954	44 236	65 809	83 944	110 308
	\tilde{V}_C	0,6200	0,5812	0,4833	0,4456	0,3834
	\tilde{R}_C	0,482909	0,776683	0,971849	0,996937	0,999981
3	\tilde{T}_C	29 878	41 384	64 850	85 142	112 031
	\tilde{V}_C	0,6391	0,6008	0,5108	0,4161	0,3403
	\tilde{R}_C	0,497628	0,726250	0,960314	0,998633	0,999999

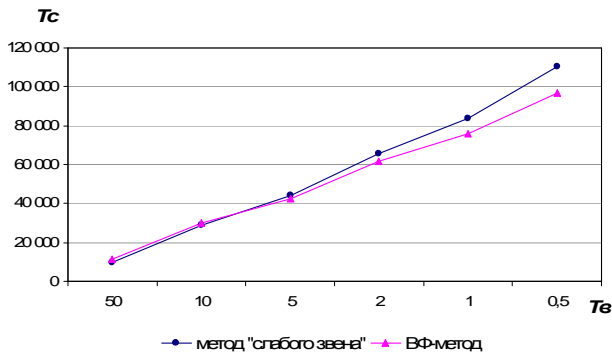
Продолж. табл. 1

4	\tilde{T}_c	28 995	42 617	64 848	90 291	108 159
	\tilde{V}_c	0,6291	0,5708	0,5146	0,3985	0,3858
	\tilde{R}_c	0,481027	0,761929	0,958956	0,999550	0,999972
5	\tilde{T}_c	29 309	40 566	65 272	86 364	106 366
	\tilde{V}_c	0,5931	0,5681	0,4869	0,3840	0,3737
	\tilde{R}_c	0,500095	0,733979	0,969450	0,999539	0,999980
6	\tilde{T}_c	28 945	43 050	67 000	84 955	112 665
	\tilde{V}_c	0,6504	0,5469	0,4275	0,3879	0,3561
	\tilde{R}_c	0,473458	0,783078	0,987692	0,999372	0,999997

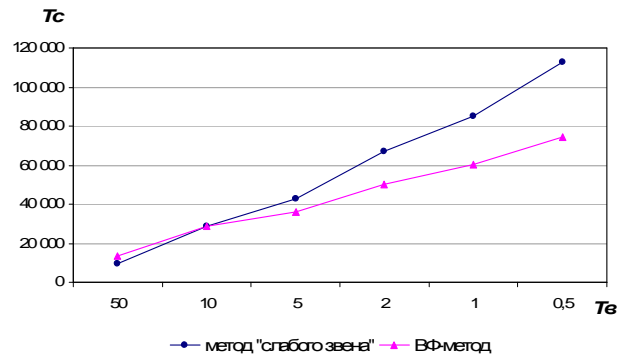
Таблица 2. Результаты аналитического расчета надежности квазимостиковой структуры ВФ-методом

Количество узлов	Характеристика надежности	Время восстановления				
		10	5	2	1	0,5
1	\tilde{T}_c	28 596	42 784	65 299	89 505	114 820
	\tilde{V}_c	0,6870	0,6013	0,5410	0,4643	0,3635
	\tilde{R}_c	0,455555	0,745469	0,950612	0,997350	0,999997
2	\tilde{T}_c	29 723	42 330	61 917	75 628	96 902
	\tilde{V}_c	0,5790	0,5047	0,4324	0,3957	0,3538
	\tilde{R}_c	0,515069	0,801499	0,977828	0,997494	0,999971
3	\tilde{T}_c	30 146	41 477	56 819	72 578	89 017
	\tilde{V}_c	0,5338	0,4803	0,4044	0,3589	0,3166
	\tilde{R}_c	0,543472	0,806461	0,973425	0,998587	0,999986
4	\tilde{T}_c	29 871	39 095	54 422	68 173	81 892
	\tilde{V}_c	0,4945	0,4488	0,3932	0,3303	0,3226
	\tilde{R}_c	0,553424	0,791901	0,969706	0,998844	0,999924
5	\tilde{T}_c	29 243	37 635	52 608	63 783	77 253
	\tilde{V}_c	0,4810	0,4351	0,3722	0,3302	0,3171
	\tilde{R}_c	0,541638	0,775934	0,971235	0,997594	0,999864
6	\tilde{T}_c	28 643	36 060	50 035	60 164	74 531
	\tilde{V}_c	0,4597	0,4165	0,3528	0,3268	0,2997
	\tilde{R}_c	0,532836	0,758505	0,968924	0,995990	0,999902

Графическая интерпретация результатов статистического моделирования и аналитического расчета приведена на рис. 4–9.

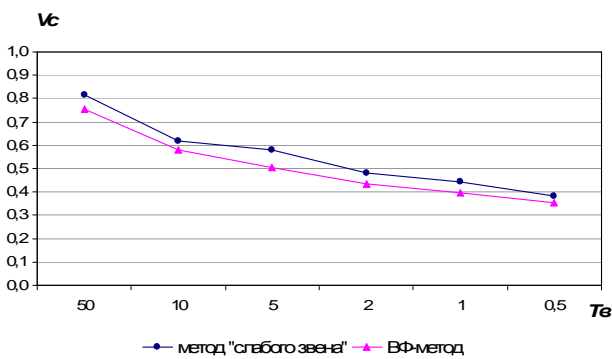


a – два узла

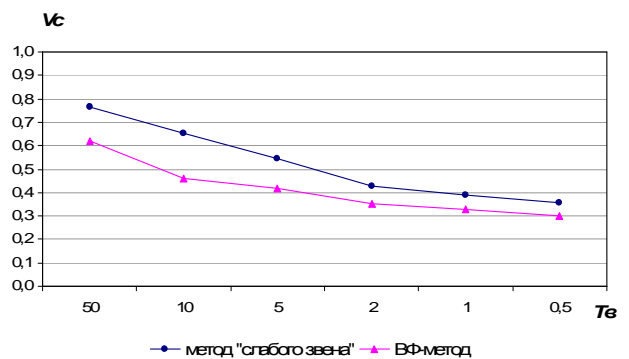


б – шесть узлов

Рис. 4. Зависимости средней наработки до первого отказа структуры от времени восстановления

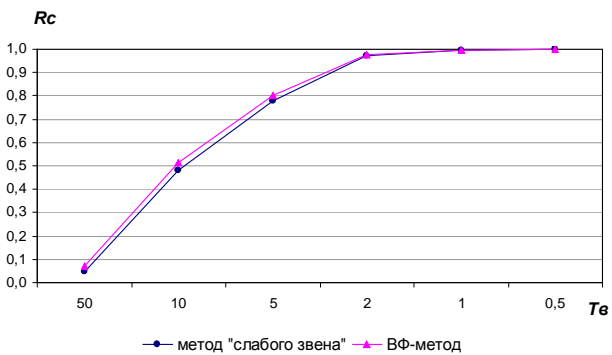


a – два узла

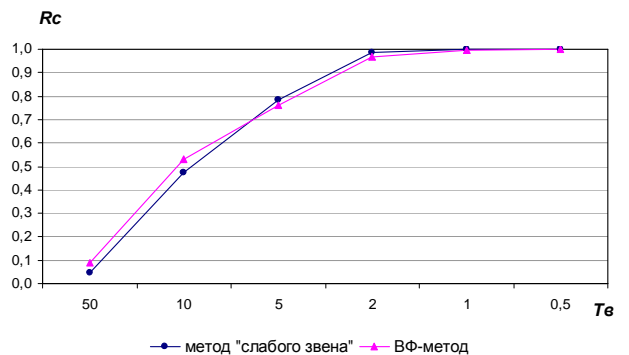


б – шесть узлов

Рис. 5. Зависимости коэффициента вариации наработки до первого отказа структуры от времени восстановления



a – два узла



б – шесть узлов

Рис. 6. Зависимости ВБР структуры от времени восстановления

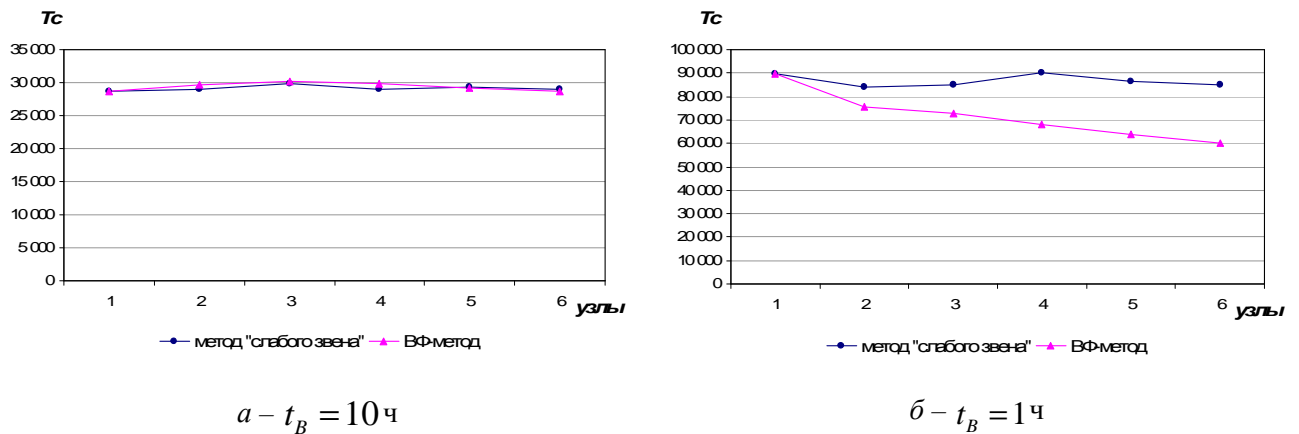


Рис. 7. Зависимости средней наработки до первого отказа структуры от количества узлов

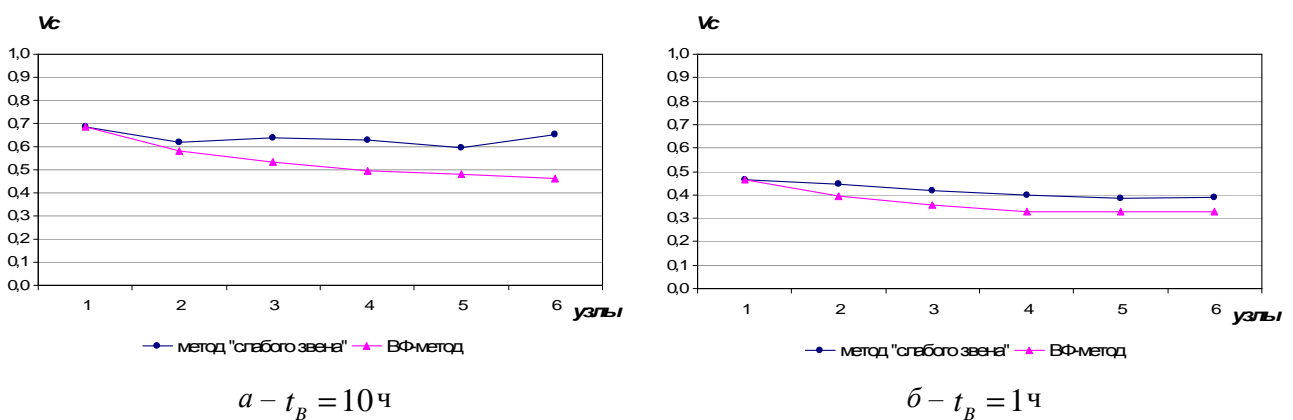


Рис. 8. Зависимости коэффициента вариации средней наработки до первого отказа структуры от количества узлов

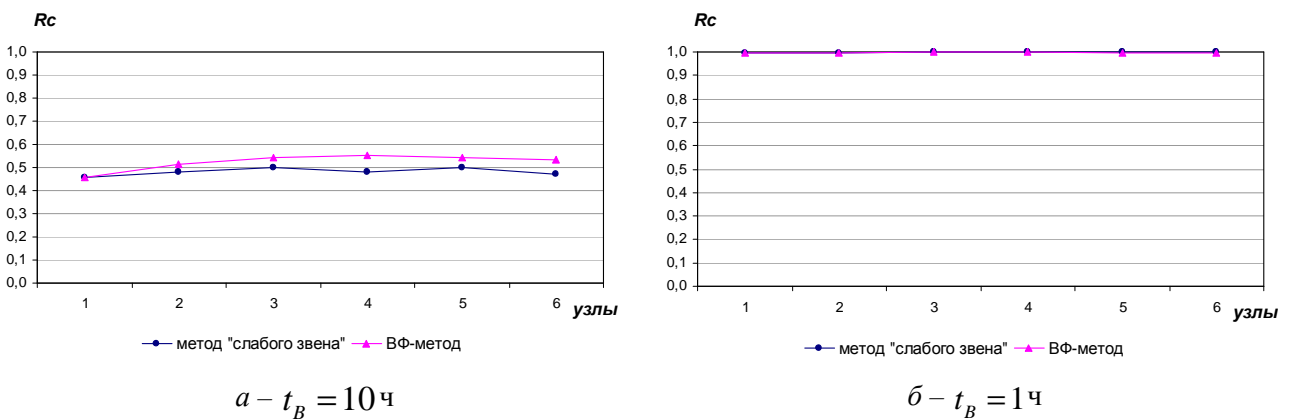


Рис. 9. Зависимости ВБР системы от количества узлов

5. Выводы

Анализ результатов моделирования (табл. 1, 2 и рис. 4–9) позволяет сделать следующие выводы:

– средняя наработка до первого отказа квазимостиковой структуры интенсивно возрастает с уменьшением времени восстановления и практически не зависит от изменения количества узлов с 1 до 6 (рис. 4 и 7 соответственно);

– вероятность безотказной работы квазимостиковой структуры также возрастает с уменьшением времени восстановления и имеет небольшую тенденцию к росту с увеличением количества узлов с 1 до 6 (рис. 6 и 9 соответственно);

– коэффициент вариации наработки до первого отказа квазимостиковой структуры снижается с уменьшением времени восстановления и имеет тенденцию к уменьшению с ростом количества узлов от 1 до 6 (рис. 5 и 8 соответственно);

– расчеты ВФ-методом, при сохранении тенденции изменения всех характеристик надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры в зависимости от времени восстановления, приводят к заниженным результатам. Зависимости характеристик надежности структуры от количества узлов, полученные по результатам расчета, имеют значительные расхождения с результатами моделирования.

Использование процедуры восстановления Э приводит к существенному повышению надежности самовосстанавливаемой квазимостиковой структуры, что является основным ее преимуществом (при небольших аппаратных затратах на самоконтроль и реконфигурацию) перед обычной самовосстанавливаемой дублированной структурой [1] и расширяет возможности применения в самых разнообразных системах с повышенными требованиями к надежности и безопасности функционирования.

Для сравнения полученных результатов с результатами моделирования невосстанавливаемой квазимостиковой структуры с теми же характеристиками надежности элементов [4, 5] воспользуемся данными табл. 3.

Таблица 3. Результаты моделирования надежности невосстанавливаемой квазимостиковой структуры методом "слабого звена"

Количество узлов	Средняя наработка до отказа системы, \hat{T}_C	Коэффициент вариации наработки до отказа системы, \hat{V}_C
1	1375	0,595
2	1329	0,476
3	1368	0,416
4	1402	0,377
5	1447	0,358
6	1484	0,340

При большом времени восстановления, например, при $t_B = 10$ ч, средняя наработка до первого отказа восстанавливаемой структуры, состоящей из 6 узлов, превышает аналогичный показатель невосстанавливаемой структуры в 19,5 раза. При дальнейшем возрастании времени восстановления до $t_B \approx T_3$ величина средней наработки до первого отказа асимптотически сходится с величиной средней наработки до отказа невосстанов-

ливаемой структуры, что подтверждает правильность алгоритма моделирования восстанавливаемой структуры.

Величина средней наработки до первого отказа не является показательной характеристикой любой избыточной восстанавливаемой структуры [7]. Это утверждение подтверждается результатами моделирования (рис. 7), поэтому в качестве основной сравнительной характеристики безотказности таких структур принимается ВБР или вероятность отказа (ВО) на момент суммарной наработки t_n .

Коэффициент вариации наработки до первого отказа восстанавливаемой квазимостиковой структуры имеет тенденцию к уменьшению с ростом количества узлов (например, для $t_B = 5$ ч и $n = 6$ на 9,2 %, для $t_B = 2$ ч и $n = 6$ на 21 %). При дальнейшем увеличении количества узлов более 6 данная тенденция должна привести к еще более ощутимому росту вероятности безотказной работы [5] восстанавливаемой структуры.

Кроме того, с ростом количества узлов уменьшается функциональная сложность ФСБ, уменьшается элементность и увеличивается надежность узла, упрощается техническая реализация ССВК (рис. 1), повышается достоверность контроля и точность диагно-

стики неисправностей структуры. Все эти факторы приводят к уменьшению времени восстановления составных частей структуры и, как следствие, к возрастанию показателей надежности восстанавливаемой квазимостиковой структуры в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муха Ар.А. Структурный синтез и анализ отказоустойчивых компьютерных систем / Ар.А. Муха, В.П. Пасько В.П. // Математичні машини і системи. – 2013. – № 2. – С. 202 – 206.
2. 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.
3. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
4. Федухин А.В. Моделирование надежности систем / А.В. Федухин, В.П. Пасько // Методы менеджмента качества. – 2012. – № 3. – С. 50 – 55.
5. Пасько В.П. Моделирование надежности невосстанавливаемой квазимостиковой структуры / В.П. Пасько // Математичні машини і системи. – 2013. – № 1. – С. 163 – 171.
6. Федухин А.В. Моделирование надежности систем средствами пакета программ RELIABmod / А.В. Федухин, В.П. Пасько // Математичні машини і системи. – 2011. – № 4. – С. 176 – 182.
7. Bouricius W.G. Reliability modeling techniques for SELF – Repairing computer Systems / Bouricius W.G., Carter W.C., Schneider P.R. – New York: IBM Watson Research Center Yorktown Heights, 1969. – P. 295 – 309.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2014