

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ НЕВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ КВАЗИМОСТИКОВОЙ СТРУКТУРЫ

Анотація. Розглянуті питання статистичного моделювання надійності квазімосткової структури на основі використання генераторів випадкових чисел, що мають DN -розподіл. Запропоновано алгоритм моделювання надійності та приклади моделювання надійності системи для різноманітних вихідних даних щодо показників надійності складових частин.

Ключові слова: статистичне моделювання, квазімосткова структура, ймовірність безвідмовної роботи.

Аннотация. Рассмотрены вопросы статистического моделирования надежности квазимостиковой структуры на основе генераторов случайных чисел, имеющих DN -распределение. Предложены алгоритм моделирования надежности и примеры моделирования надежности системы для различных исходных данных на показатели надежности составных частей.

Ключевые слова: статистическое моделирование, квазимостиковая структура, вероятность безотказной работы.

Abstract. The questions of statistical modelling of quasibridge structure reliability are considered on the basis of generators of the random numbers having DN -distribution. The algorithm of reliability modelling and examples of systems reliability modeling for the various initial data on reliability parameters of components are offered.

Keywords: statistical modelling, quasibridge structure, probability of no-failure operation.

1. Введение

Резервирование как способ повышения надежности широко используется для достижения безотказной работы различного вида систем. На сегодняшний день практически все сложные системы аппаратно подкрепляются дублирующими комплектами. Наиболее простым способом введения избыточности является способ дублирования всей системы.

Анализ всех дублированных структур со слабыми, умеренными и сильными связями показал, что основным недостатком являются их невысокая эксплуатационная готовность, так как любой отказ в одном из каналов переводит систему либо в нерабочее защитное состояние, либо в работу по одному исправному каналу (в зависимости от логической функции восстанавливающего органа ВО). С целью повышения эксплуатационной готовности в [1] был предложен новый класс дублированных структур с реконфигурацией, позже получивший название квазимостиковых.

Целью работы является дальнейшее исследование надежности квазимостиковой структуры средствами пакета программ RELIABmod v.2.0.

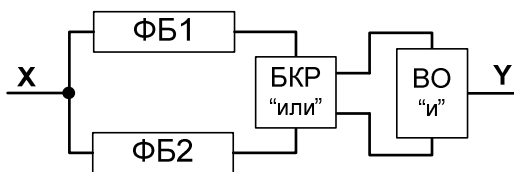


Рис. 1. Дублированная структура со слабыми связями

2. Структура избыточной отказоустойчивой системы

Итак, в общем виде система имеет двухканальную (дублированную) структуру из двух функциональных блоков (ФБ1 и ФБ2), где 1, 2 – соответственно 1-ый и 2-ой каналы (рис. 1). При отказе одного из каналов система продолжает работу по другому, сохранившему работоспособность, каналу.

С целью повышения безотказности и эксплуатационной готовности такой системы предлагается ее декомпозиция, при которой каждый ФБ разбивается на n функциональных субблоков (ФСБ) (далее по тексту – элементов структуры (Э)), которые с помощью блока контроля и реконфигурации (БКР) образуют n дублированных узлов. Если ФБ разбиваются на условно равнонадежные Э, то средняя наработка до отказа такого Э может быть вычислена по формуле $T_{\Sigma} = \sqrt{n} \cdot T_{\text{ФБ}}$ [2].

Структурная схема декомпонированной системы приведена на рис. 2. Визуально она напоминает мостиковую структуру ССН-4, в которой вместо центрального типового элемента системы установлен блок контроля и реконфигурации (БКР), осуществляющий непрерывный контроль исправности Э и выполняющий перекрестные связи между каналами в случае отказа Э. Такая новая структура получила название «квазимостиковой».

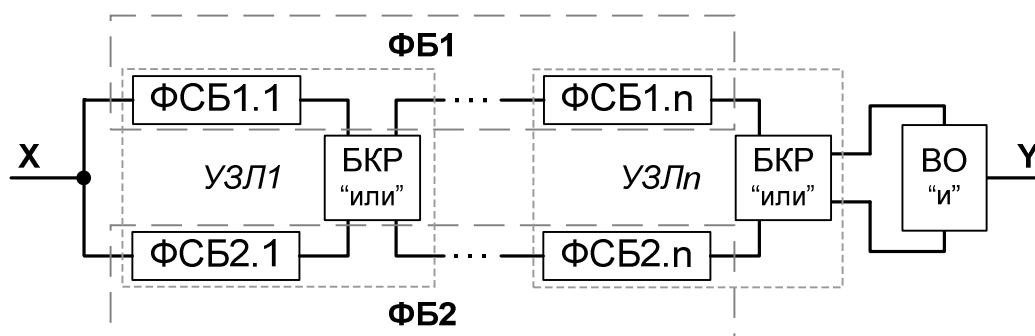


Рис. 2. Квазимостиковая структура

3. Моделирование надежности системы

Для статистического моделирования надежности сложных систем используется специально разработанный пакет программ – RELIABmod v.2.0 [3]. Пакет программ позволяет производить прогнозирование надежности объектов, имеющих самые разнообразные структурные схемы надежности (ССН). В отличие от известных программных продуктов, RELIABmod v.2.0 имеет следующие особенности:

- осуществляет генерацию случайных величин, имеющих DN -распределение и экспоненциальное распределение;
- учитывает надежность восстанавливающего органа системы;
- учитывает возможности реконфигурации системы при отказе ее составных частей;
- учитывает тренд параметров надежности составных частей системы во времени;
- производит расчет количественных показателей надежности моделируемой системы по данным о надежности элементов системы, полученным в результате моделирования;
- осуществляет графическую интерпретацию результатов моделирования.

Расширенные возможности пакета программ позволяют более адекватно анализировать технические особенности и структуру системы, что в конечном итоге влияет на качество проектирования и снижает сложность системы.

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

Аналитические описания алгоритмов статистического моделирования и расчета ВФ-методом [2] приведены ниже. В качестве теоретической модели надежности всех компонентов системы используется диффузионное немонотонное распределение (DN -распределение) наработки до отказа. Для простоты анализа результатов принимается, что устройства БКР и ВО абсолютно надежны.

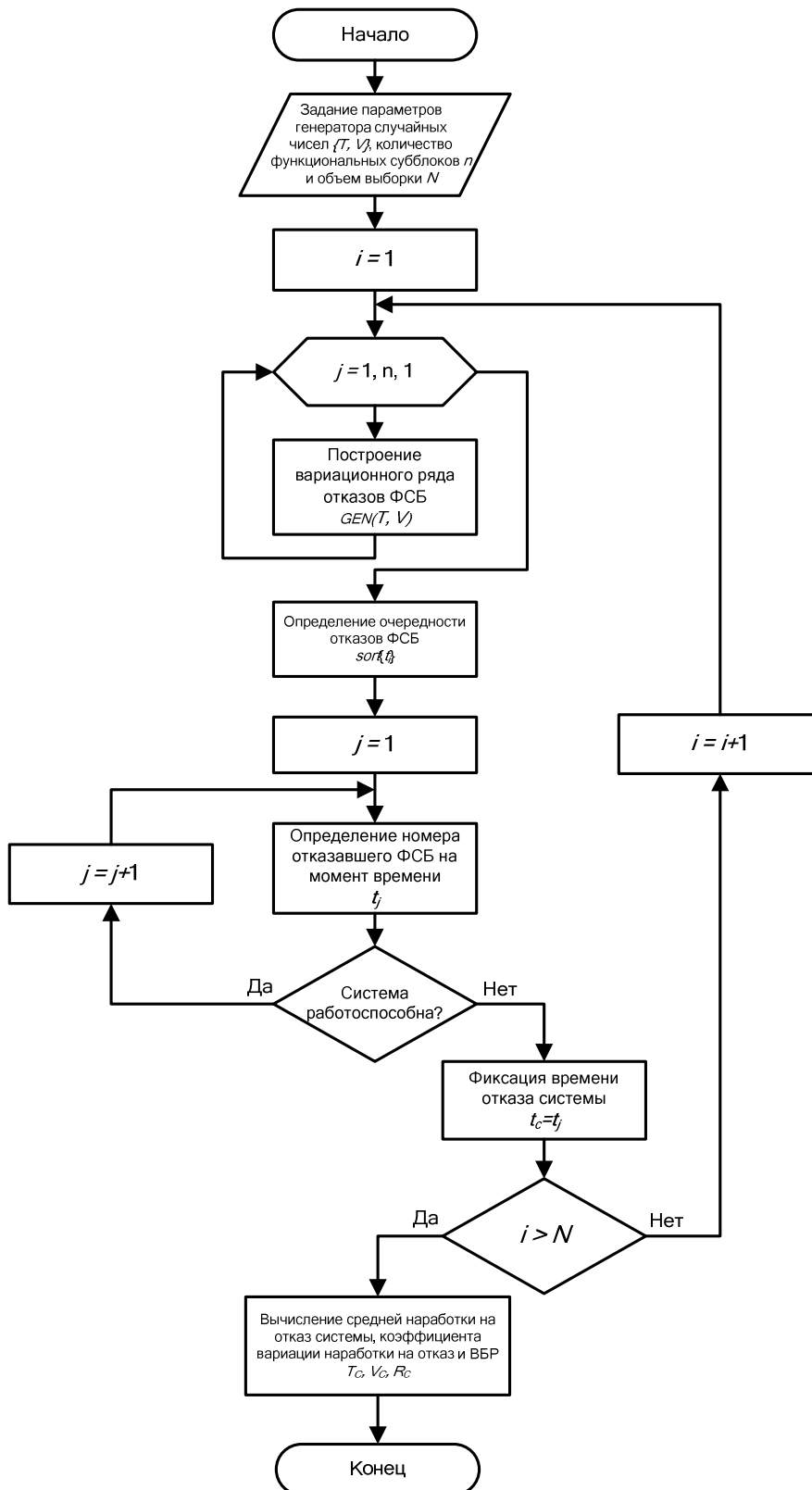


Рис. 3. Блок-схема алгоритма моделирования надежности квазимостиковой структуры

Алгоритм статистического моделирования

Моделирование надежности системы начинается с генерации случайных наработок до отказа всех Э, входящих в состав структуры, и осуществляется по следующему алгоритму:

1. Генерация наработок до отказа всех Э системы с учетом двух каналов 1 и 2:

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

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

где $\hat{t}_{\mathcal{E}ij1}, \hat{t}_{\mathcal{E}ij2}$ – случайные i -е наработки до отказа 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;

$T_{\mathcal{E}j}, V_{\mathcal{E}j}$ – параметры генератора, соответственно, априорные значения средней наработки до отказа и коэффициента вариации наработки до отказа элемента j -го типа.

2. Анализ наработок до отказа Э двух каналов и определение наработки до отказа системы \hat{t}_{C_i} . 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 $\hat{t}_{\mathcal{E}ij1}$ и $\hat{t}_{\mathcal{E}ij2}$.

3. Вычисление средней наработки до отказа системы:

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

4. Вычисление коэффициента вариации наработки до отказа системы:

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

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

По результатам моделирования дополнительно вычисляются следующие характеристики надежности структуры.

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

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

6. Определение средних наработок до отказа каждого типа Э, используя статистическую информацию об отказах элементов обоих каналов:

$$\hat{T}_{\mathcal{E}j1} = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{t}_{\mathcal{E}ij1}}{N}; \quad \hat{T}_{\mathcal{E}j2} = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{t}_{\mathcal{E}ij2}}{N}.$$

Усредненное значение средней наработки до отказа каждого типа Э вычисляется по формуле

$$\hat{T}_{\varepsilon j} = \frac{\hat{T}_{\varepsilon j1} + \hat{T}_{\varepsilon j2}}{2}.$$

7. Определение коэффициентов вариации наработки до отказа каждого типа узла:

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

8. Определение коэффициентов вариации наработки до отказа каждого типа Э:

$$\hat{V}_{\varepsilon j1} = \frac{\sqrt{\hat{D}_{t_{\varepsilon j1}}}}{\hat{T}_{\varepsilon j1}}; \quad \hat{V}_{\varepsilon j2} = \frac{\sqrt{\hat{D}_{t_{\varepsilon j2}}}}{\hat{T}_{\varepsilon j2}}.$$

Усредненное значение коэффициента вариации каждого типа Э вычисляется по формуле

$$\hat{V}_{\varepsilon j} = \frac{\hat{V}_{\varepsilon j1} + \hat{V}_{\varepsilon j2}}{2}.$$

9. Определение вероятности безотказной работы (ВБР) каждого типа Э:

$$\hat{R}_{\varepsilon j} = R_{DN}(\hat{T}_{\varepsilon j}, \hat{V}_{\varepsilon j}, t_H),$$

где $R_{DN}(\bullet)$ – функция ВБР для DN-распределения.

10. Определение ВБР каждого типа узла:

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

11. Определение ВБР системы через значения \hat{T}_C и \hat{V}_C :

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

Алгоритм расчета ВФ-методом по данным, полученным в процессе моделирования

1. Определение средней наработки до отказа каждого типа узла:

$$\tilde{T}_{y_j} = \sqrt{2}\hat{T}_{\varepsilon j}.$$

2. Определение средней наработки до отказа системы:

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

где n – количество узлов в последовательной структуре системы.

3. Определение коэффициента вариации наработки до отказа каждого типа узла:

$$\tilde{V}_{y_j} = \frac{\hat{V}_{\varepsilon j}}{\sqrt{2}}.$$

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

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

5. Определение ВБР каждого типа узла:

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

6. Определение ВБР системы через значения \tilde{T}_C и \tilde{V}_C :

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

4. Результаты исследования надежности системы

В качестве примера рассмотрим результаты статистического моделирования и аналитического расчета ВФ-методом невосстанавливаемой квазимостиковой структуры с параметрами $T_{\Phi B1} = T_{\Phi B2} = 1000ч$ (рис. 2). При декомпозиции системы на равнонадежные узлы средняя наработка до отказа элемента определялась по формуле $T_{\ominus} = \sqrt{n} \cdot T_{\Phi B}$. Исходные значения коэффициентов вариации наработки до отказа неизбыточных ФБ и Э принимались равными $V_{\Phi B} = V_{\ominus} = 0,75$. Оценка вероятности безотказной работы элементов, узлов и системы в целом осуществлялась на момент суммарной наработки $t_H = 500ч$.

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

Таблица 1. Результаты моделирования надежности квазимостиковой структуры методом "слабого звена" (т.е. наработке до отказа системы соответствует минимальное время наработки до отказа узла системы)

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	0,941447
2	1329	0,476	0,974066
3	1368	0,416	0,987481
4	1402	0,377	0,993361
5	1447	0,358	0,996614
6	1484	0,340	0,998116
7	1529	0,324	0,998970
8	1576	0,312	0,999444
9	1618	0,307	0,999664
10	1647	0,299	0,999775

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

Количество узлов	Средняя наработка до отказа системы, \tilde{T}_C	Коэффициент вариации наработки до отказа системы, \tilde{V}_C	Вероятность безотказной работы системы, \tilde{R}_C
1	1420	0,518	0,973104
2	1417	0,523	0,971379
3	1418	0,530	0,969554
4	1415	0,532	0,968515
5	1416	0,528	0,969921
6	1405	0,526	0,969115
7	1410	0,528	0,969276
8	1415	0,527	0,970178
9	1422	0,528	0,970404
10	1408	0,528	0,969024

Графическая интерпретация результатов статистического моделирования и аналитического расчета приведена на рис. 4–6.

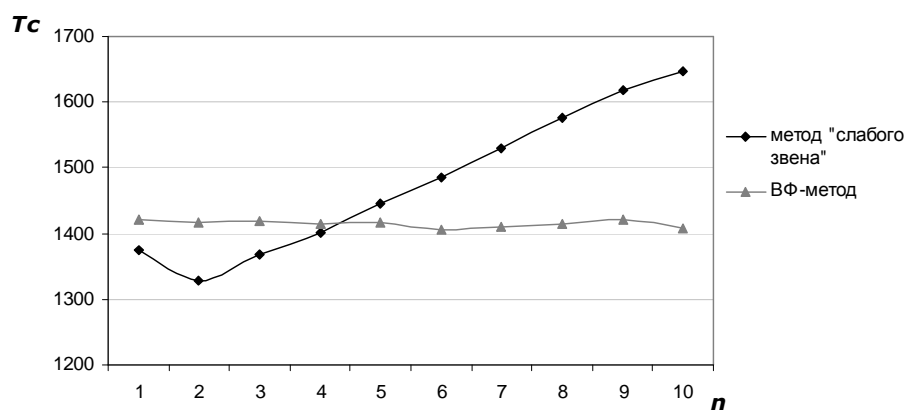


Рис. 4. Функция средней наработки на отказ системы в зависимости от количества узлов

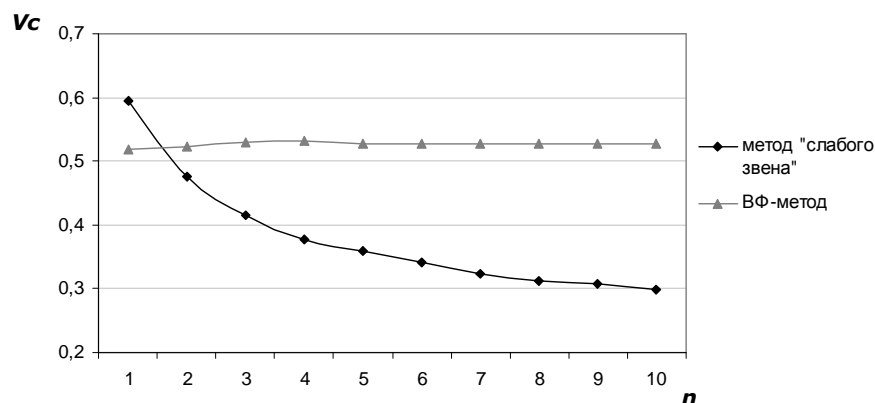


Рис. 5. Функция коэффициента вариации наработки на отказ системы в зависимости от количества узлов

На рис. 4 приведены зависимости средней наработки до отказа системы в зависимости от количества равнонадежных узлов. При количестве узлов от 2 до 3 квазимостиковая структура несколько уступает по величине средней наработки до отказа (максимально при 2 узлах на 3,3 %) системе с одним узлом, т.е. дублированной системе, а при четырех узлах уже превышает на 2 % и превышение это тем больше, чем больше узлов в системе. В отличие от результатов моделирования, расчет ВФ-методом, как и расчет λ -методом, дают постоянную среднюю наработку до

отказа квазимостиковой структуры независимо от количества узлов в ней.

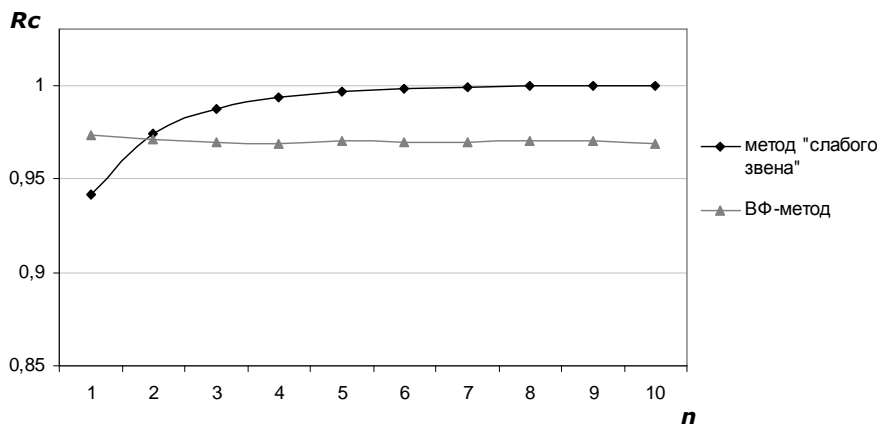


Рис. 6. Функция ВБР системы в зависимости от количества узлов

ной величиной, равной коэффициенту вариации наработки до отказа узла (при последовательном соединении равнонадежных узлов [2]), а имеет тенденцию к уменьшению с ростом количества узлов в системе. Оба эти факта, свидетельствующие об увеличении средней наработки до отказа квазимостиковой системы и одновременном уменьшении коэффициента вариации наработки до отказа при увеличении количества узлов в системе, позволяют осмыслить и причины роста вероятности безотказной работы системы, зависимость которой приведена на рис. 6.

5. Выводы

В статье описан метод моделирования надежности квазимостиковой структуры на основе использования генераторов случайных чисел, имеющих DN -распределение. Метод, реализованный в пакете программ RELIABmod v.2.0, позволяет моделировать надежность такого класса систем при различных исходных данных показателей надежности составных частей.

В процессе исследований установлено, что при количестве узлов $n > 4$ средняя наработка до отказа квазимостиковой системы превышает аналогичный показатель для простой дублированной структуры. Использование декомпозиции ФБ-системы на ряд ФСБ (элементов) и образование из них так называемых узлов приводит также к значительному увеличению и вероятности безотказной работы системы.

Интересным является тот факт, что с увеличением количества узлов коэффициент вариации наработки до отказа системы существенно уменьшается, что, наряду с ростом средней наработки до отказа, также является причиной роста вероятности безотказной работы системы.

Результаты статистического моделирования системы по методу "слабого звена" и аналитического расчета ВФ-методом с использованием данных моделирования надежности элементов существенно отличаются. Гипотеза равенства коэффициента вариации наработки до отказа последовательной системы, состоящей из равнонадежных элементов, коэффициенту вариации наработки до отказа элемента не нашла своего подтверждения в результатах моделирования. Исследованиями установлено, что с увеличением количества последовательно соединенных узлов в квазимостиковой структуре коэффициент вариации наработки до отказа не является постоянной величиной, а имеет тенденцию к уменьшению, что и предопределяет расхождение в результатах моделирования и аналитического расчета ВФ-методом.

Использование на практике квазимостиковой структуры для проектирования гарантоспособных систем открывает большие возможности в направлении повышения их экс-

На рис. 5 приведены зависимости коэффициента вариации наработки до отказа системы. Моделирование надежности квазимостиковой системы показало, что коэффициент вариации наработки до отказа системы не является постоян-

плутационной надежности при незначительном увеличении аппаратных затрат на реализацию функций самоконтроля и реконфигурации.

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. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
3. Федухин А.В. Моделирование надежности систем / А.В. Федухин, В.П. Пасько // Методы менеджмента качества. – 2012. – № 3. – С. 50 – 55.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2012