

УДК 681.51-192

А.А. УШАКОВ, В.С. ХАРЧЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКОЙ С УЧЕТОМ ФАКТОРОВ СРЕДЫ

Сформулирована задача оценки влияния отказов на работоспособность встроенных систем управления с программируемой логикой (ВСУПЛ). Раскрыты возможные пути решения задачи при помощи различных методов моделирования. Описан метод имитационного моделирования (МИМ). Представлены результаты имитационного моделирования одноканальной, дублированной и мажоритарной структур ВСУПЛ при кратных отказах, а также способ проверки их результатов по точечным значениям, полученным с использованием аналитических зависимостей. В заключение представлена концепция целостной модели ВСУПЛ для заданного множества кратных отказов.

встроенные системы управления, программируемые логические интегральные схемы, имитационное моделирование, кратные отказы

Введение

Современная элементная база для встроенных систем управления (ВСУ) бортовых систем для аэрокосмических приложений, к которым предъявляется ряд жестких требований по надежности, живучести, габаритомассовым и энергетическим характеристикам, определяет два возможных подхода к их реализации (рис. 1) [1].

Первый из них базируется на использовании традиционных микропроцессорных комплектов больших интегральных схем (БИС), в которых отказоустойчивость обеспечивается путем различных методов контроля, диагностирования и реконфигурации, реализуемых аппаратными и/или программными средствами [2, 3]. При этом резервирование выполняется на внекристальном уровне, а реконфигурируемость внутрикристального пространства ограничивается степенью программного доступа к его элементам. Следует отметить, что эволюция методов и средств обеспечения отказоустойчивости для микропроцессорной реализации ВЦС, поддерживающей универсальность за счет использования фоннеймановских и постфоннеймановских архитектур, осуществляется в определенном смысле «в темпе» развития технологий этой группы и ускоряется при

появлении новых программно-аппаратных решений при ужесточении требований к цифровым системам для критических приложений [4].

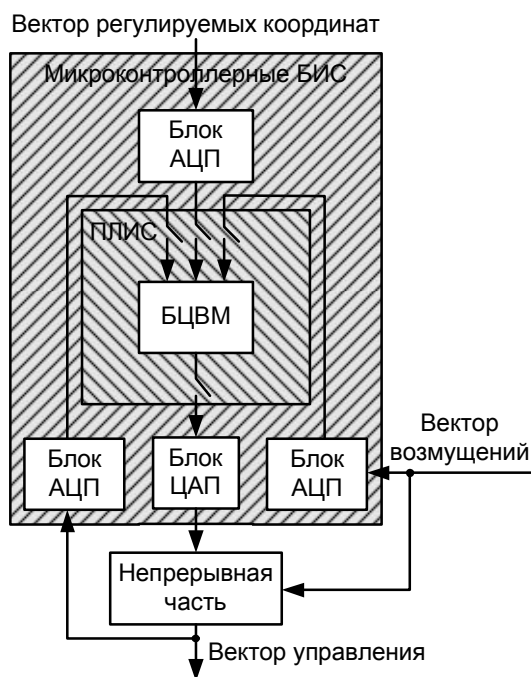


Рис. 1. Реализация ВСУ на микроконтроллерных БИС и ПЛИС

Второй подход, получивший широкое распространение в последнее десятилетие и имеющий позитивную динамику, результатом которой является постепенное вытеснение микропроцессорных реше-

ний в ряде относительно несложных приложений, связан с внедрением CPLD и FPGA технологий, в русскоязычной литературе получившие наименование ПЛИС-технологий (программируемые логические интегральные схемы) [5 – 7]. Предтечей ПЛИС явились программируемые логические матрицы, различные модификации которых использовались для синтеза простых цифровых устройств с нерегулярной структурой. По отношению к ним ПЛИС-технология имеет ряд принципиальных отличий количественного (увеличение числа внутренних элементов – логических вентилей от сотен и тысяч до 4...6 миллионов [6, 7]) и качественного характера (возможность многократного и оперативного, практически в реальном масштабе времени, перепрограммирования структуры имплементированного в кристалл цифрового проекта). Универсальность ПЛИС-подхода к синтезу ВСУ обусловлена возможностью программируемой настройки внутреннего логического пространства, в том числе реализации многопроцессорных «ядер» с любым обрамлением, и, по существу, вычислителя ВСУ. Микросхемы ПЛИС являются относительно новым объектом обеспечения отказоустойчивости вследствие того, что 90-е годы были связаны прежде всего с совершенствованием инструментальных средств автоматизированного проектирования, внутрикристалльного тестирования и верификации цифровых проектов и их внедрением в наиболее массовых приложениях.

1. Формулирование проблемы

Последние несколько лет ВСУПЛ, а также собственно программируемые интегральные схемы, активно исследуются прежде всего с точки зрения физики отказов внутрикристалльных элементов в естественных условиях и в условиях агрессивной внешней среды [8 – 10]. Необслуживаемые или частично-обслуживаемые ВСУПЛ для критических приложений должны сохранять работоспособность

при отказах десятков и сотен элементов ПЛИС [10]. С учетом этого обстоятельства, а также специфики рассматриваемой технологии, представляет теоретический и практический интерес анализ и разработка методов оценки и обеспечения отказоустойчивости ВСУПЛ.

Опыт проектирования ВСУ аэрокосмического применения говорит о необходимости предварительного анализа факторов внешней среды (определении профиля жизненного цикла в условиях внешней среды) [11, 12]. Определение профиля включает в себя анализ условий среды применения и предсказание потенциальных событий (последствий), возникающих при эксплуатации ВСУ в данных условиях. Причем такой стандартный анализ должен быть проведен для всего жизненного цикла системы. Согласно [12] должны быть приняты для рассмотрения следующие факторы: аппаратная конфигурация; набор внешних сред, в которых используется система; платформные/аппаратные интерфейсы; интерфейсы с другими системами; длительность эксплуатации в каждой из сред; вероятность возникновения событий в средах; географическое местоположение миссии и другая вспомогательная информация. В результате анализа приведенных факторов описывается набор возможных событий (сбоев, отказов), а также техника имитации данного класса событий. Оценивается как действие одного фактора, так и комбинированное действие ряда факторов. Суммарный эффект может быть более разрушителен, чем кумулятивный эффект отдельных факторов. Все факторы внешней среды классифицируются следующим образом: по природе возникновения (природные/естественные (например, дождь, ионизация, метеориты) и вызванные (например, ускорение, ядерная радиация, вибрация)); для систем аэрокосмического применения – по высоте орбиты (наземное или низкоатмосферное, высокоатмосферное или космическое). Для ВСУПЛ аэрокосмического применения характерными факторами являются радиационная среда

и температурный режим. Если задача обеспечения надлежащего теплового режима является задачей обеспечения технологии изготовления и конструкции, то задача проектирования радиационностойкой аппаратуры является задачей в большей мере проектировщика самой ВСУ.

В процессе функционирования ВСУПЛ возможно возникновение сбоев и отказов внутренних элементов ПЛИС (логических ячеек, средств конфигурирования), а также отказов выводов чипа. Поэтому для обеспечения работоспособности должны использоваться методы внутри- и внекристального резервирования. Очевидно, что эти два уровня резервирования и специфика ПЛИС-технологии, позволяющей оперативно реконфигурировать внутрикристальное пространство, дают возможность реализовать огромное число методов введения избыточности и получить сотни отказоустойчивых структур ВСУПЛ. Отказы элементов ВСУПЛ могут быть вызваны процессами старения («естественные» отказы) и действием агрессивной внешней среды. Отказы внутренних элементов ПЛИС могут быть как одиночными, так и кратными. Следует отметить, что ВСУПЛ являются программно-аппаратными системами и их отказы могут обуславливаться также и дефектами, вносимыми при разработке цифровых проектов с использованием различных языков и инструментальных средств [13].

Для оценки отказоустойчивости ВСУПЛ могут использоваться:

1) комбинаторно-вероятностный метод (КВМ), основанный на переборе событий, связанных с отказами различных элементов систем рассматриваемого класса (внутренних элементов и выводов ПЛИС, внешних элементов, поддерживающих отказоустойчивость) [14, 15]. При этом внутрикристальная структура ВСУПЛ считается фиксированной и изменение в реальном масштабе времени не проводится;

2) пространственно-вероятностный метод (структурно-пространственный) (ПВМ), отличающийся от предшествующих тем, что функциональные части ВСУПЛ могут «мигрировать» внутри кристалла при одиночных и кратных отказах его элементов [16]. Отказ системы (или ее канала) наступает при невозможности размещения цифрового проекта внутри кристалла. Данный метод, как и КВМ, также основан на переборе событий при различных комбинациях отказов, однако учитывает особенности размещения проекта в ПЛИС;

3) метод имитационного моделирования, позволяющий детально учитывать физику отказов элементов, проецировать физический кластер на логическую структуру ВСУПЛ, задавать различные распределения параметров кластеров, их возникновения во времени и таким образом более точно оценивать отказоустойчивость исследуемых систем при естественных отказах и отказах, обусловленных экстремальными воздействиями различной мощности [17].

Целью статьи является разработка метода имитационного моделирования отказоустойчивых структур бортовых систем с учетом факторов внешней среды, вызывающих кратные отказы, ВСУПЛ и исследование его взаимосвязи с вероятностными методами (КВМ и ПВМ) для повышения достоверности результатов.

2. Задачи имитационного моделирования кратных кластерных отказов ВСУПЛ

Структурно-пространственная модель и система аналитических зависимостей [16] основаны на ряде ограничений и допущений, которые могут быть сняты имитационной моделью.

При моделировании с использованием ПВМ было принято ограничение о том, что функциональные области отказоустойчивых структур отстоят друг от друга на расстояние большее, чем размер кластера.

Однако в действительности кластер может проявляться сразу в нескольких областях.

При аналитическом моделировании не рассматривалось взаимное пространственное расположение областей. При рассмотрении кластерных отказов, которые одновременно проявляются в нескольких областях (рис. 2), существует зависимость количества одновременных отказов функциональных областей от длины общей стороны. Примером такой зависимости может быть случай, когда две прямоугольные области расположены вертикально друг относительно друга. При одинаковом расстоянии между областями по вертикали, изменяя расстояние по горизонтали, можно разнести области на расстояние, большее размерности кластерного отказа. В этом случае событие, связанное с одновременным отказом двух функциональных областей, будет отсутствовать. При более сложных конфигурациях отказов, то есть при расположении отказа в двух измерениях, довольно трудно описать аналитически столь сложные зависимости.

Имитационная модель позволяет снять все вышеуказанные ограничения вероятностных методов.

3. Сущность, допущения и ограничения имитационной модели кратных кластерных отказов ВСУПЛ

На рис. 2 все поле представляет собой микросхему ПЛИС, разбитую на элементарные объекты моделирования, которые в свою очередь состоят из некоторого набора структурных элементов ПЛИС. Их объединение в элементарный объект моделирования производится таким образом, что отказ любого элементарного объекта, если он находится в пределах функциональной области, приводит к отказу всей области (последствия отказа одинаковы). Черный прямоугольник представляет собой кластерный вертикальный отказ из трех элементарных ячеек. Серые прямоугольники с наклонной штриховкой – функциональные об-

ласти. Жирными линиями показаны возможные границы кратного отказа двух функциональных областей.

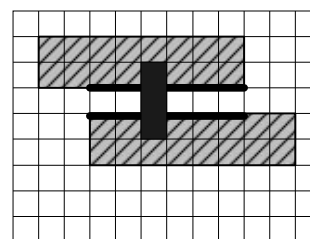


Рис. 2. Пример взаимного расположения функциональных областей и кластерного отказа

Отсутствие информации о временных параметрах отказов ПЛИС ввиду новизны элементной базы и недоступности информации о микросхемах военного применения привело к идее разработки событийной модели. Модель рассматривает реакцию системы на особые события – отказы разного вида. При происшествии таких событий система мгновенно переходит из начального работоспособного состояния либо в новое неработоспособное, либо остается в исходном. Последствия отказа функциональной области на состояние всего ВСУПЛ определяется ее структурной схемой надежности, где составными частями схемы являются функциональные области. Динамика отказов и переходных процессов не рассматривается, а учитываются лишь конечные состояния. Выделены следующие факторы, влияющие на вероятность безотказной работы:

- 1) логическая емкость всей микросхемы;
- 2) доля логической емкости микросхемы, необходимая для реализации отказоустойчивой структуры и определенной функциональной области;
- 3) форма функциональных областей;
- 4) размещение областей (т.е. расстояние между одинаковыми или различными областями).

Для выбора варианта реализации структуры ВСУПЛ с наилучшим показателем безотказности предлагается ранжировать все возможные варианты реализации ВСУПЛ по значению вероятности безотказной работы и вторичным факторам. В ка-

честве такого фактора для микросхемы с определенной логической емкостью и фиксированным распределением емкости между функциональными областями отказоустойчивой структуры предлагается расстояние между функциональными областями. Таким образом, отсортировав полученные результаты по вторичному фактору, можно оценить взаимное влияние вероятности безотказной работы и вторичного фактора. Ожидаемым результатом такой оценки влияния факторов является рекомендация по расположению катастрофичных к единичному отказу и некатастрофичных к единичному отказу функциональных областей друг относительно друга. Катастрофичными считаются области, которые расположены последовательно в схеме надежности структуры (нерезервированная часть структуры ВСУПЛ). Таким образом, по цели эксперимента имитационная модель позволяет решить ряд задач: оценка взаимного влияния факторов, отыскание оптимальных значений параметров системы и др.

При имитационном моделировании вводится набор случайных величин, описывающих закон генерации конфигурации кластерного отказа [17]:

1) случайная величина, описывающая множество возможных размерностей кластеров, т.е. выделяется наиболее вероятная размерность или выбирается закон генерации размерностей;

2) случайная величина, описывающая распределение кластеров во множестве определенной размерности. Выделяется наиболее вероятная конфигурация кластера определенной размерности или выбирается закон генерации конфигураций кластеров определенной размерности;

3) случайная величина, определяющая координатную привязку кластерного отказа к имитационному полю ВСУПЛ.

Следовательно, первичными факторами данной модели будут являться уровень критичности отказа функциональной области, порядок расположения

областей и расстояние между областями, закон генерации конфигурации кластерного отказа. Вторичными факторами модели будут параметры микросхемы, распределение логического ресурса на реализацию отказоустойчивой структуры и конкретной функциональной области структуры. Все эти факторы будут принимать ряд фиксированных значений в ходе моделирования.

При моделировании рассматриваются те же резервированные структуры, которые исследовались с помощью аналитических зависимостей [15, 16]. Любая из структур описывается набором ресурсов, необходимых для ее реализации: наличием/отсутствием средств контроля/диагностирования и реконфигурации (СКДР); количеством элементарных ячеек ПЛИС для реализации канала обработки информации (КОИ) вычислителя ВСУ; количеством элементарных ячеек ПЛИС для реализации канала контроля/диагностирования и реконфигурации ВСУ.

Начальным этапом моделирования является задание размеров имитационного поля, а также всех параметров функциональных областей структур (размера и формы). Далее обосновывается уровень катастрофичности отказа одной функциональной области и сочетания нескольких областей. Размер функциональных областей задается из расчета возможности расположения в микросхеме структуры с наибольшими ресурсами. Для простоты реализации инструментальных средств поддержки моделирования любая функциональная область представлялась прямоугольником с заданной площадью. Моделирование проводится при принятых параметрах путем изменения пространственного расположения функциональной области в микросхеме, расстояния между функциональными областями, а также конфигурации отказа.

Ожидаемым результатом модели является зависимость размещения резервированных и нерезервированных областей от параметров отказов.

4. Пример имитационной модели

В ходе моделирования исследовалась микросхема XC2V1000 размерностью 80×64 логических ячеек и 324 вывода (один набор входов/выходов области – 20% выводов микросхемы). Параметры функ-

циональных областей приведены в табл. 1. Моделирование проводилось при заданной достоверности оценки $Q = 0,95$ и точности оценки $\varepsilon = 0,025$ [18, 19]. Такие параметры точности и достоверности оценки считаются в литературе наихудшими допустимыми.

Таблица 1

Распределение логической емкости отказоустойчивых структур

Параметры функциональных областей	Тип структуры		
	одноканальная	дублированная	мажоритарная
Канал обработки информации (25% от емкости микросхемы) – 1280 ячеек, N×M	32×40	80×16	80×16
Средства контроля, диагностирования и реконфигурации (10% от емкости микросхемы) – 512 ячеек	27×19	64×8	
Коммутатор каналов (50% от количества выходов канала обработки информации) – 32 ячейки		32×1	
Мажоритарный орган (75% от количества выходов канала обработки информации) – 49 ячеек			49×1

4.1. Имитационная модель кластерных отказов одноканальных структур

Результаты имитационного моделирования одноканальной структуры не представляют интереса, так как вероятность безотказной работы не зависит от взаимного расположения канала обработки информации и средств контроля, диагностирования и реконфигурации. Этот факт объясняется тем, что структурную схему надежности одноканального устройства можно представить последовательно соединенными элементами. Любой отказ одного из элементов приведет к отказу всего устройства.

4.2. Имитационная модель кластерных отказов дублированных структур

Приведем пример имитационной модели для унифицированной дублированной структуры. При имитационном моделировании будем рассматривать случай вертикального расположения функциональных областей компилятором САПР ПЛИС-проектов – расположение одинаковых копий функциональных областей в одном блоке.

Наиболее вероятными способами компоновки функциональных областей дублированной структуры для проектировщика аппаратуры является разделение проекта по функциональному признаку. В этом случае будет производиться объединение каналов обработки информации, каналов контроля, диагностирования и реконфигурации в отдельные блоки.

Рассмотрим случай, когда дублированная структура расположена согласно рис. 3 и табл. 2. Началом координат принимаем верхний левый угол устройства (координата [1, 1]).

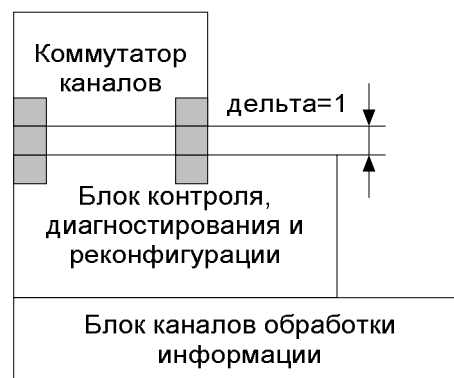


Рис. 3. Расположение функциональных областей дублированной структуры

Таблица 2

Начальные пространственные параметры функциональных областей

Функциональные области	Пространственные параметры функциональных областей					
	Координата верхнего левого угла		Длина области	Ширина области	Расстояние до предыдущей области/ грани по x	Разница в координате с предыдущей областью/ гранью по y
	координата x	координата y				
Коммутатор каналов	1	1	32	1	0	0
СКДР ₁	1	2	64	8	0	0
СКДР ₂	1	10	64	8	0	0
КОИ ₁	1	18	80	16	0	0
КОИ ₂	1	34	80	16	0	0

Таблица 3

Зависимость вероятности безотказной работы от расстояния между функциональными областями

Номер эксперимента	Расстояние между коммутатором каналов и блоком СКДР	Расстояние между блоком СКДР и блоком КОИ	Вероятность безотказной работы
1	0	0	0,732231
2	0	1	0,726016
3	0	2	0,727869
4	0	3	0,720161
5	1	0	0,727049
6	1	1	0,719200
7	1	2	0,735000
8	1	3	0,739167
9	2	0	0,707031
10	2	1	0,696183
11	2	2	0,713492
12	2	3	0,711811
13	3	0	0,700775
14	3	1	0,708594
15	3	2	0,716800
16	3	3	0,723577

Зависимость вероятности безотказной работы приведена в табл. 3 и на рис. 4 – 6 для случая изменения расстояния между коммутатором каналов (КК), блоком каналов контроля, диагностирования и реконфигурации и блоком каналов обработки информации. Имитировались вертикальные отказы из трех логических ячеек.

4.3. Имитационная модель кластерных отказов мажоритарных структур

Как и ранее, при моделировании рассматривались вертикально расположенные функциональные области. Движение областей проводилось по вертикали. Исследовались два случая расположе-

ния мажоритарных структур: структура, расположенная согласно рис. 7 и табл. 4 (эксперимент 1), и структура, расположенная согласно рис. 8 и табл. 5 (эксперимент 2). Началом координат принимаем верхний левый угол устройства (координата [1, 1]). Зависимость вероятности безотказной работы от расстояний между функциональными областями для эксперимента 1 (случая изменения расстояния между КОИ 1, КОИ 2 и КОИ 3) приведена в табл. 6, для эксперимента 2 (случая изменения расстояния между КОИ 2, мажоритарным элементом и КОИ 3) – в табл. 7. Имитировались вертикальные отказы из трех соседних логических ячеек.

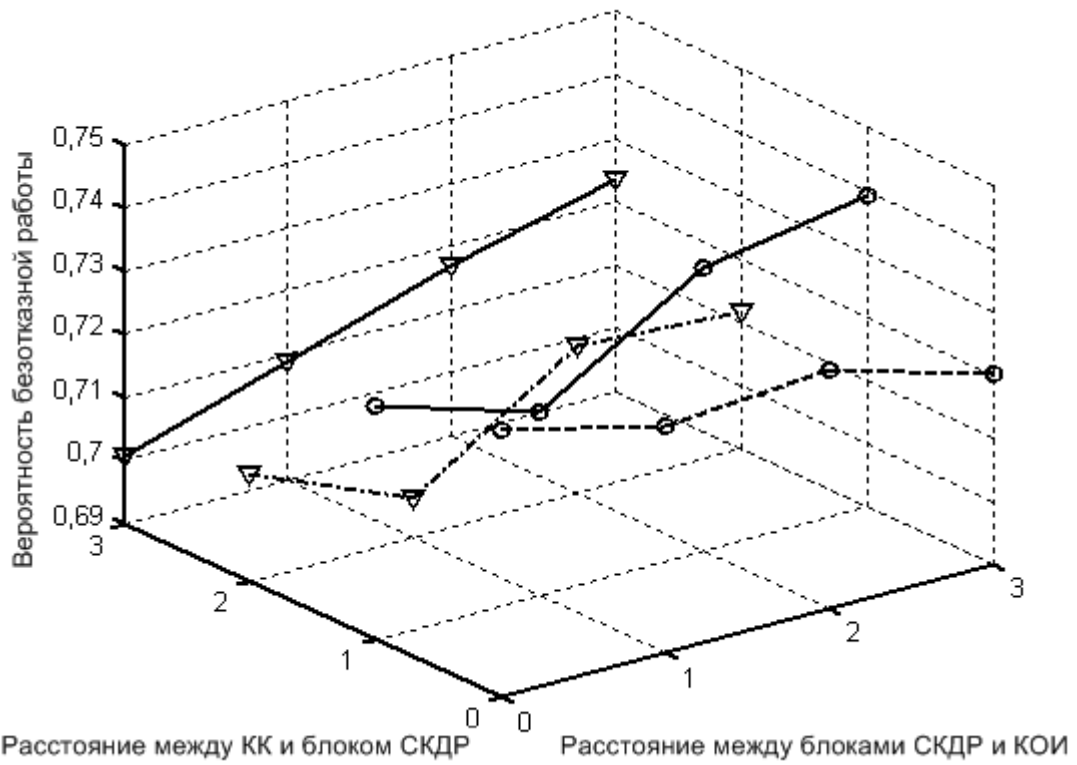


Рис. 4. Зависимость вероятности безотказной работы дублированной структуры при отказах из трех вертикальных ячеек от расстояний между блоками областей

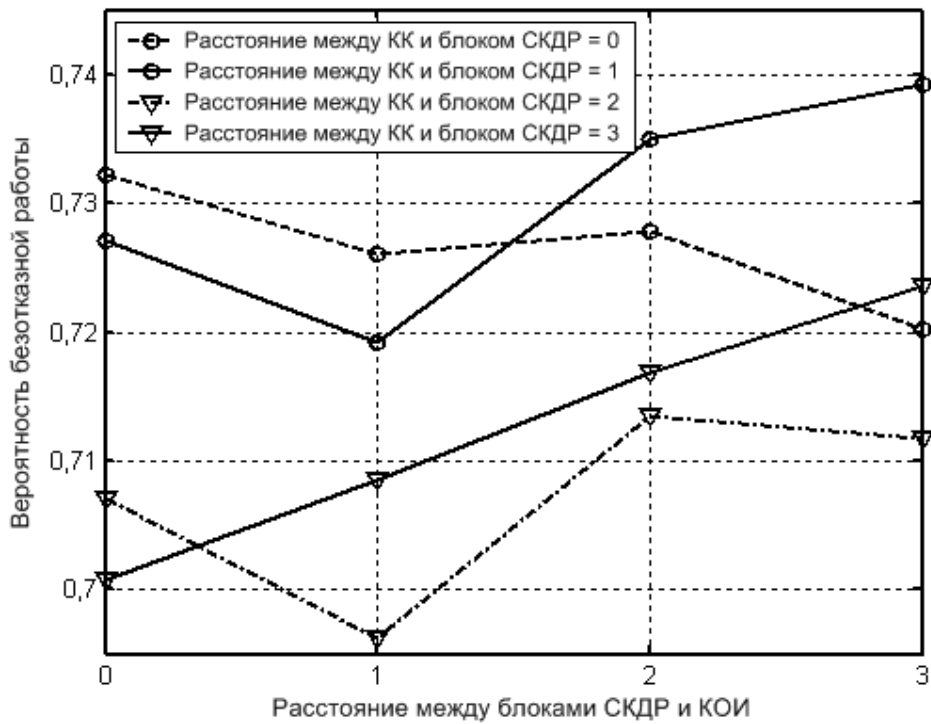


Рис. 5. Вероятность безотказной работы дублированной структуры при фиксированных расстояниях между коммутатором каналов и блоком СКДР и изменяющемся расстоянии между блоком СКДР и КОИ

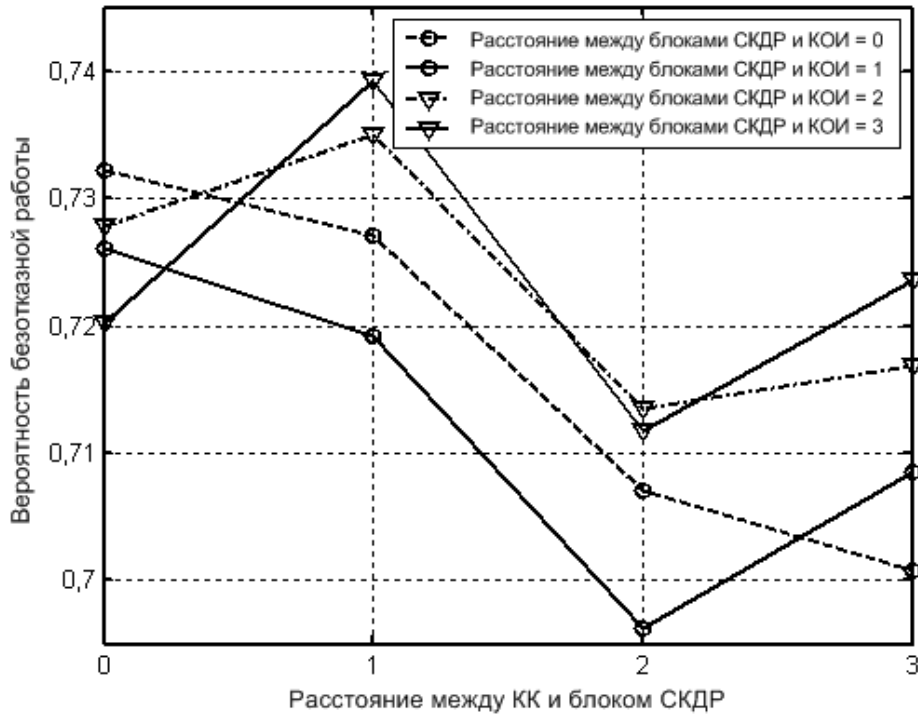


Рис. 6. Вероятность безотказной работы дублированной структуры при фиксированных расстояниях между блоком СКДР и КОИ и изменяющемся расстоянии между коммутатором каналов и блоком СКДР

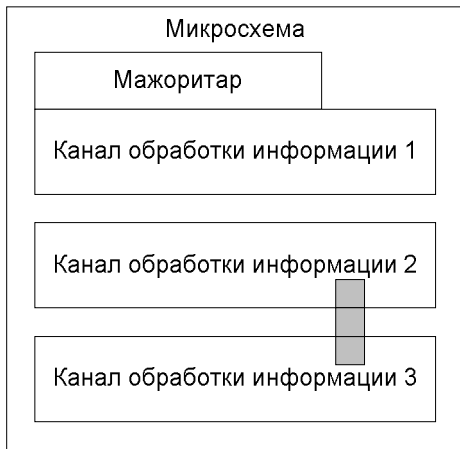


Рис. 7. Расположение функциональных областей мажоритарной структуры (эксперимент 1)

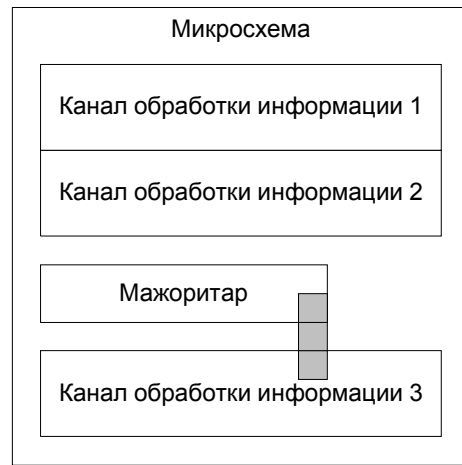


Рис. 8. Расположение функциональных областей мажоритарной структуры (эксперимент 2)

Таблица 4

Начальные пространственные параметры функциональных областей (эксперимент 1)

Функциональная область	Пространственные параметры функциональных областей					
	Координата верхнего левого угла		Длина области	Ширина области	Расстояние до предыдущей области/ грани по x	Разница в координате с предыдущей областью/ грани по y
	координата x	координата y				
Мажоритарный орган	1	1	49	1	0	0
КОИ 1	1	2	80	16	0	0
КОИ 2	1	18	80	16	0	0
КОИ 3	1	34	80	16	0	0

Таблица 5

Начальные пространственные параметры функциональных областей (эксперимент 2)

Функциональная область	Пространственные параметры функциональных областей					
	Координата верхнего левого угла		Длина области	Ширина области	Расстояние до предыдущей области/ границы по x	Разница в координате с предыдущей областью/ границы по y
	координата x	координата y				
КОИ 1	1	1	80	16	0	0
КОИ 2	1	17	80	16	0	0
Мажоритарный орган	1	33	49	1	0	0
КОИ 3	1	34	80	16	0	0

Таблица 6

Зависимость вероятности безотказной работы от расстояния между функциональными областями

Номер опыта	Расстояние между областями КОИ ₁ и КОИ ₂	Расстояние между областями КОИ ₂ и КОИ ₃	Вероятность безотказной работы
1	0	0	0,872222
2	0	1	0,893333
3	0	2	0,944444
4	0	3	0,957143
5	1	0	0,872222
6	1	1	0,893333
7	1	2	0,975000
8	1	3	0,983333
9	2	0	0,916667
10	2	1	0,927273
11	2	2	0,925000
12	2	3	0,936364
13	3	0	0,975000
14	3	1	0,950000
15	3	2	0,975000
16	3	3	0,987500

Таблица 7

Зависимость вероятности безотказной работы от расстояния между функциональными областями

Номер опыта	Расстояние между КОИ ₂ и мажоритарным элементом	Расстояние между мажоритарным элементом и КОИ ₃	Вероятность безотказной работы
1	0	0	0,916327
2	0	1	0,925581
3	0	2	0,940000
4	0	3	0,927907
5	1	0	0,919565
6	1	1	0,929268
7	1	2	0,909804
8	1	3	0,903704
9	2	0	0,901818
10	2	1	0,925000
11	2	2	0,909615
12	2	3	0,888525
13	3	0	0,914286
14	3	1	0,929268
15	3	2	0,914000
16	3	3	0,922727

5. Проверка результатов имитационного моделирования точечными значениями аналитических зависимостей

Для подтверждения результатов имитационного моделирования при расстоянии между функциональными областями меньше размеров кластера целесообразно вернуться к записи точечных аналитических зависимостей.

Рассмотрим зависимости, полученные для дублированной структуры (табл. 3, рис. 5). При моделировании ширина всех функциональных областей была больше размера кластера по вертикали, т.е. на полученную зависимость не будет влиять событие, связанное с одновременным отказом трех функциональных областей (каналов).

Все точки на графике далее нумеруются согласно следующему соглашению: первая цифра соответствует номеру эксперимента при фиксированном расстоянии между коммутатором каналов и блоком СКДР, вторая цифра – номер у эксперимента при изменяемом расстоянии между блоком СКДР и блоком КОИ. Количество благоприятных исходов отказа дублированной структуры для точки 1.1 (расстояние между блоками равно нулю) можно записать аналитическим выражением

$$C_{\text{DUPL}} = C_{\text{SW}} + C_{\text{SW_SP}} + C_{\text{SP}} + C_{\text{SP_CH}} + C_{\text{CH_CH}}, \quad (1)$$

где C_{SW} – количество отказов только коммутатора каналов; $C_{\text{SW_SP}}$ – количество одновременных отказов коммутатора каналов и СКДР; C_{SP} – количество отказов только СКДР; $C_{\text{SP_CH}}$ – количество одновременных отказов СКДР и КОИ; $C_{\text{CH_CH}}$ – количество одновременных отказов двух каналов. Уравнение получено по структурной схеме надежности ВСУПЛ, поэтому не включает событие, связанное с отказом одного КОИ.

Для прямоугольных областей и данного соотно-

шения сторон выражение (1) переписывается в виде

$$C_{\text{DOUPL}} = (M_{\text{SW}} + 2)N_{\text{SW}} + (M_{\text{SP}} + 2)N_{\text{SP}} - 2N_{\text{SW}} + C_{\text{CH_CH}},$$

где M_i – высота i -й области; N_i – ширина i -й области; $C_{\text{CH_CH}}$ – количество одновременных отказов двух каналов (постоянно и равно $2N_{\text{CH}}$).

Слагаемое $(M_{\text{SW}} + 2)N_{\text{SW}}$ описывает все отказы области коммутатора канала и одновременные отказы коммутатора каналов и блока СКДР. Слагаемое $(M_{\text{SP}} + 2)N_{\text{SP}}$ описывает отказы блока СКДР и одновременные отказы коммутатора каналов и блока СКДР. Слагаемое $2N_{\text{SW}}$ с отрицательным знаком представляет собой уже учтенные одновременные отказы коммутатора канала и СКДР. Слагаемое, описывающее одновременные отказы блока СКДР и блока КОИ, уже учтено отказами блока СКДР. Для точек 1.2, 1.3 и 1.4 график должен быть прямой, так как количество одновременных отказов блоков СКДР и КОИ постоянно.

Для случая, когда расстояние между коммутатором каналов и блоком СКДР равно одной элементарной ячейке, выражение (1) примет вид

$$C_{\text{DOUPL}} = (M_{\text{SW}} + 2)N_{\text{SW}} + (M_{\text{SP}} + 2)N_{\text{SP}} - N_{\text{SW}} + C_{\text{CH_CH}}.$$

Это выражение справедливо для точек 2.1, 2.2, 2.3, 2.4.

Для точек 3.1 и 4.1 аналитическое выражение не будет содержать отказов, проявляющихся одновременно в блоках КОИ и СКДР. Таким образом, выражение (1) примет вид

$$C_{\text{DOUPL}} = (M_{\text{SW}} + 2)N_{\text{SW}} + (M_{\text{SP}} + 2)N_{\text{SP}} + C_{\text{CH_CH}}.$$

Согласно точечной аналитической модели получаем графическую зависимость, представленную на рис. 9 и в табл. 8.

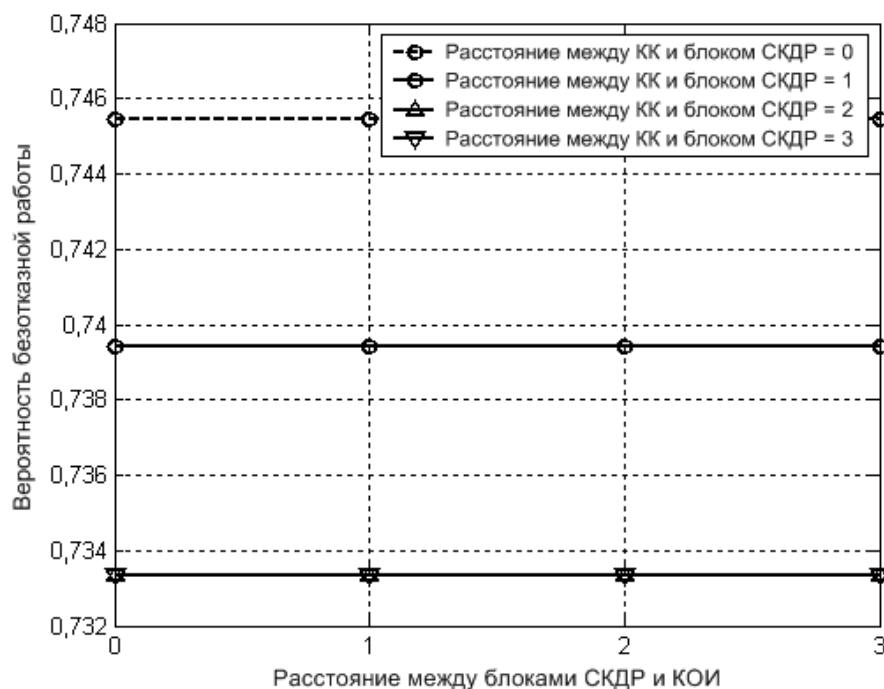


Рис. 9. График точечной аналитической зависимости дублированной структуры (эксперимент 1)

Таблица 8

Зависимость вероятности безотказной работы от расстояния между функциональными областями согласно аналитической и имитационной моделям (эксперимент 1)

Номер эксперимента	Расстояние между коммутатором каналов и блоком СКДР	Расстояние между блоком СКДР и блоком КОИ	Вероятность безотказной работы (аналитическая модель)	Вероятность безотказной работы (имитационная модель) для точек 1.1, 2.1, 3.1, 4.1
1	0	0	0,7455	0,732231
5	1	0	0,7394	0,727049
9	2	0	0,7333	0,707031
13	3	0	0,7333	0,700775

Проанализируем случай фиксированных расстояний между блоками СКДР и КОИ и изменяющегося расстояния между коммутатором каналов и блоком средств контроля/диагностирования и реконфигурации. В этом случае все четыре графика будут совпадать, так как изменение начального положения блока КОИ (расстояния между блоками средств контроля/диагностирования и реконфигурации и КОИ) не будет влиять на количество отказов структуры.

Согласно точечной аналитической модели получаем графическую зависимость, представленную на рис. 10 и в табл. 9.

6. Применение результатов имитационного моделирования. Метод адаптации к отказам

Предложенная методика моделирования является основой оценки различных архитектур отказоустойчивых ВСУПЛ и вариантов конфигураций определенной архитектуры. Разработанные инструментальные средства позволяют:

1) оценивать вероятность безотказной работы существующего проекта по средствам перекодировщика файла трассировки, файла отчета и базы данных микросхем ПЛИС в логическую структуру микросхемы;

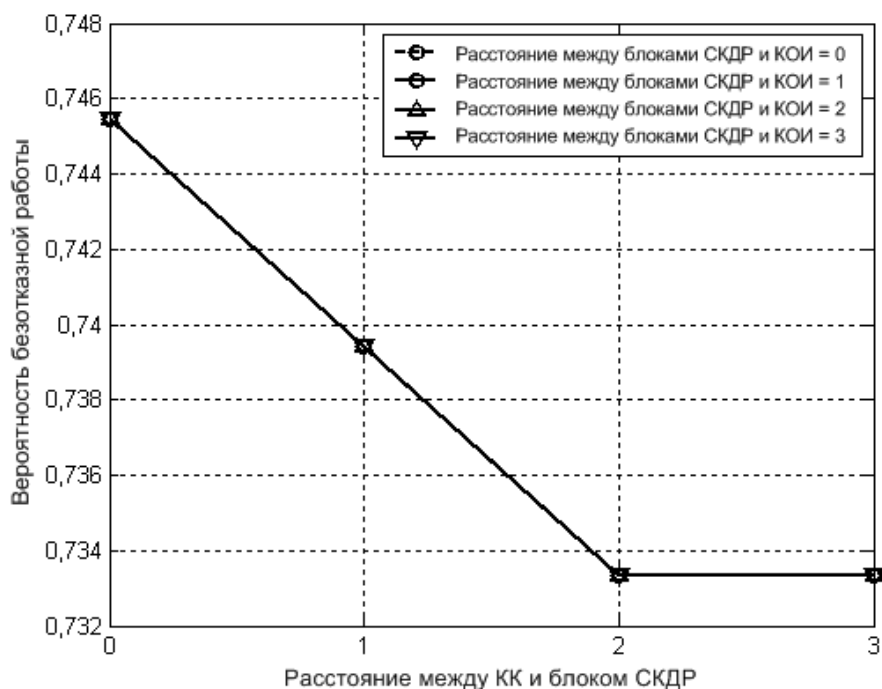


Рис. 10. График точечной аналитической зависимости дублированной структуры (эксперимент 2)

Таблица 9
 Зависимость вероятности безотказной работы от расстояния между функциональными областями согласно аналитической и имитационной моделям (эксперимент 2)

Номер эксперимента	Расстояние между коммутатором каналов и блоком СКДР	Расстояние между блоком СКДР и блоком КОИ	Вероятность безотказной работы (аналитическая модель)	Вероятность безотказной работы (имитационная модель) для точек 1.1, 1.2, 1.3, 1.4
1	0	0	0,7455	0,732231
5	0	1	0,7394	0,726016
9	0	2	0,7333	0,727869
13	0	3	0,7333	0,720161

2) выбирать вариант архитектуры и конфигурации ВСУПЛ из известного множества отказоустойчивых структур для определенного вида отказа по показателю вероятности безотказной работы;

3) прогнозировать вариант архитектуры и конфигурации ВСУПЛ при существующем одноканальном варианте проекта для определенного вида отказа по показателю вероятности безотказной работы.

Возможность такой оценки является основой для создания метода адаптации и выбора отказоустойчивых архитектур ВСУПЛ, который позволяет получать исходную и последующие конфи-

гурации системы, динамически изменяемые в процессе накопления отказов. Сущность предлагаемой адаптации состоит в том, что в отличие от известных методов [20, 21], реконфигурация может выполняться не только в рамках фиксированной структуры путем ее переноса на работоспособные ячейки кристалла, но и путем перехода к структуре с наилучшим уровнем вероятности безотказной работы. Изначальная имплементация проекта реализуется структурой с наилучшим показателем вероятности безотказной работы. Метод адаптации также предполагает использование дополнительной избыточности на уровне микро-

схемы, а не выделение пространственных блоков и внесение в них дополнительной избыточности на этапе производства микросхемы или проектирования цифрового устройства. Это позволяет компиляторам варьировать возможное размещение проекта в микросхеме при реконфигурации.

Разработанные методы моделирования и адаптации ВСУПЛ позволяют проектировщику цифровых устройств на ПЛИС оценить вероятность безотказной работы при кратных отказах любой конфигурации, целесообразность реконфигурации цифрового устройства на ПЛИС к той или иной отказоустойчивой структуре.

В результате комплексирования базовых моделей получен набор программных подсистем, оценивающих различные отказоустойчивые структуры при определенной кратности и пространственной конфигурации отказов. Имитационная модель благодаря настраиваемому блоку генерации отказов может описать различные законы их возникновения во времени и пространстве. Эти инструментальные средства позволяют произвести выбор оптимальной структуры по показателям логической емкости микросхемы и устойчивости к конкретным типам отказов.

Результаты оценки, получаемые с использованием аналитических зависимостей и МИМ, позволяют сформулировать ряд рекомендаций по наиболее выгодной конфигурации каналов (для случая прямоугольной конфигурации) при известной конфигурации кластеров.

7. Программно-технические средства имитационного моделирования

В качестве исходных данных к имитационной модели используется информация, получаемая при разработке проекта в системе автоматизированного проектирования, информация о характере и последствиях возможных отказов, а также база данных возможных отказоустойчивых структур

ВСУПЛ. Таким образом, создается набор программных моделей, необходимых для имитационного моделирования [15 – 17]. Архитектура системы имитационного моделирования представлена на рис. 11.

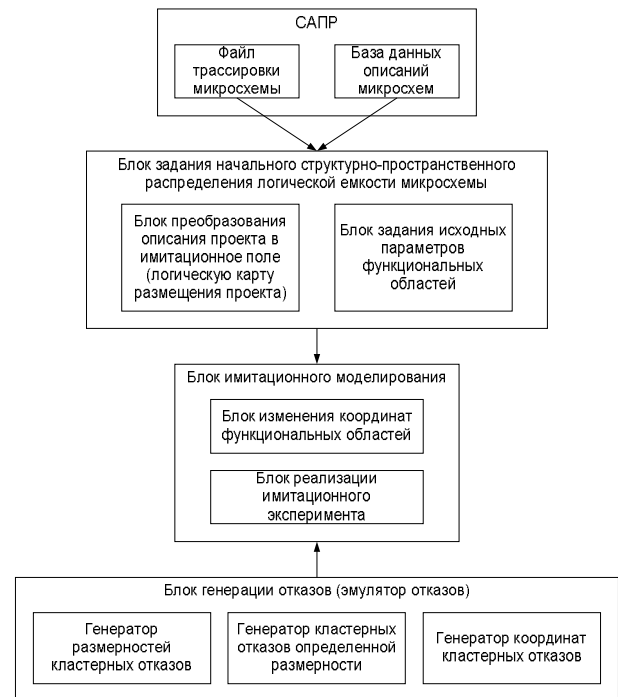


Рис. 11. Архитектура системы имитационного моделирования кратных кластерных отказов прокетов ВСУ на ПЛИС

Начальным этапом моделирования является программная модель ВСУПЛ. Исходными данными программной модели ВСУПЛ является либо откомпилированный проект отказоустойчивого устройства, либо предполагаемые данные о размещении проекта, вводимые пользователем. По базе данных микросхем составляется логическая карта микросхемы. Следующим этапом модели является программная модель цифрового устройства на ПЛИС. По готовому файлу трассировки проекта в полученной логической карте фиксируются используемые ячейки со связями с другими ячейками и ячейками ввода-вывода. Имитационная модель работает с файлами трассировки (fit-файлами) системы автоматического проектирования MAX+plus II фирмы Altera. Другим вариан-

том ввода исходных данных для моделирования может являться задание размерности имитационного поля и соотношения (распределения) логических ресурсов микросхемы ПЛИС между функциональными областями.

На основании информации об отказах строится эмулятор отказов в логической модели ВСУПЛ. Эмулятор поддерживает генерацию всех ранее описанных пространственных параметров кластерного отказа.

Следующим этапом моделирования является собственно проведение модельного эксперимента. Оно проводится путем последовательного изменения координат функциональных областей в двух измерениях. Для каждого фиксированного положения функциональных областей проводится событийная генерация отказов согласно настройке эмулятора отказов. Для каждой типовой отказоустойчивой структуры в соответствии с набором отказавших функциональных областей в ходе эксперимента принимается решение о возможности отказа всей структуры. Имитационное моделирование проводится до достижения между всеми функциональными областями расстояния, равного размерности отказа (граничное расстояние может быть настроено), либо при выходе координаты любой области за пределы имитационного поля.

Заключение

Предложенная имитационная модель позволяет изменять пространственные характеристики функциональных областей и отказов, производить оценку устойчивости структур для смеси кластеров различных конфигураций, вводить кластеры различных конфигураций для каждой области элементарных структур ПЛИС и границ элементарных областей. Разработан подход к записи и простейший набор аналитических выражений для точечного описания устойчивости ВСУПЛ к отка-

зам в зависимости от расстояний между функциональными областями.

МИМ отличается от ранее разработанных методов тем, что позволяет моделировать кластеры с заданными характеристиками и оценивать их влияние на отказоустойчивость различных вариантов структур ВСУПЛ. Запись аналитических зависимостей при большой размерности и сложной геометрии конфигурации кластерного отказа затрудняется полным перебором событий/состояний, связанных с отказом. Метод позволяет проводить ограниченное число экспериментов с определенной доверительной точностью. Семейство моделей, положенных в его основу, дает возможность оценивать проекты на базе отказоустойчивых структур, выбирать структуры и формировать конфигурации структур с наилучшим показателем вероятности безотказной работы. Эта особенность в свою очередь положена в основу метода адаптации ВСУПЛ при кластерных кратных отказах различной конфигурации. Дальнейшее усовершенствование методов моделирования связано с учетом возможности деградации (снижения функциональности) структур при накоплении отказов (внезапных, деградационных и параметрических).

Литература

1. Сняжков А.М., Шаймарданов Ф.А. Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками: Учебник для студентов высших технических учебных заведений. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.
2. Поливанов А., Попов В. О возможности применения microPC в бортовых устройствах космических аппаратов // Chip News. – 2000. – № 4 (43). – С. 70 – 72.
3. Харченко В.С., Юрченко Ю.Б. IOTS-подход: анализ вариантов структур отказоустойчивых бортовых комплексов при использовании электронных

- компонентов Industry // Chip News. – 2003. – № 7 (80). – С. 28 – 39.
4. Гобчанский О. Проблемы создания бортовых вычислительных комплексов малых космических аппаратов // Современные технологии автоматизации. – 2001. – № 4. – С. 28 – 33.
5. Соловьев В.В. Проектирование цифровых систем на программируемых логических интегральных схемах. – М.: Горячая линия-Телеком, 2001. – 636 с.
6. Xilinx Data Book. – <http://www.xilinx.com>. – 2000.
7. Altera Digital Library. – <http://www.altera.com>. – March 2002.
8. Katz R., Barto R., Erickson K. Logic Design Pathology and Space Flight Electronics // Proceedings of MAPLD-1999 Conference. – <http://klabs.org>. – P. 1 – 28.
9. Andraka R.J., Brady P.E., Brady J.L. A Low Complexity Method for Detecting Configuration Upset in SRAM Based FPGAs // Proceedings of MAPLD-2002 Conference. – <http://klabs.org>. – P. 1 – 7.
10. Weigand D., Harlacher M. Design of a Radiation-Tolerant Low-Power Transceiver // Proceedings of MAPLD-2001 Conference. – <http://klabs.org>. – P. 1 – 6.
11. LaBel K.A., Johnston A.H., Barth J.L. Emerging Radiation Hardness Assurance (RHA) issues: A NASA approach for space flight program. – <http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/>. – P. 1 – 12.
12. Environmental Factors. NASA Preferred Reliability Practices. Practice No. PD-EC-1101. – P. 1 – 16.
13. Семенец В.В., Хаханова И.В., Хаханов В.И. Проектирование цифровых систем с использованием языка VHDL. – Х.: ХНУРЭ, 2003. – 492 с.
14. Kharchenko V.S., Tarasenko V.V. The Multi-version Design Technology of an Onboard Fault-Tolerant FPGA Devices // Proceedings of MAPLD-2001 Conference. – <http://klabs.org>. – P. 1 – 9.
15. Ushakov A.A., Kharchenko V.S., Tarasenko V.V. Fault-tolerant embedded PLD-systems: structures, simulation, design technologies // Proceedings of the 10th International Conference “Mixed design of integrated circuits and systems” (MIXDES-2003). – Lodz, Poland. – 2003. – P. 546 – 551.
16. Ushakov A.A., Kharchenko V.S. Fault-tolerant on-board PLD-systems: a space-structural simulation and methods of adaptation // Proceedings of East-West Design & Test Conference (EWDTC-2003). Radioelectronics & informatics. – 2003. – № 3. – P. 100 – 106.
17. Якимец Н.В., Ушаков А.А. Анализ типов отказов и разработка настраиваемого генератора отказов ПЛИС // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ». – 2003. – № 6. – С. 149 – 152.
18. Гулятьев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: Учебный курс. – СПб.: Питер, 2000. – 432 с.
19. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Учебник для ВУЗов по спец. «Автоматизированные системы управления». – М.: Высш. шк., 1985. – 217 с.
20. Fekete S.P., Köhler E., Teich J. Optimal FPGA Module Placement with Temporal // Precedence Constraints, Proceedings of Design Automation and Test in Europe Conference (DATE-2001). – Munich, Germany. – 2001. – P. 657 – 665.
21. Харченко В.С., Тарасенко В.В. Методы резервирования цифровых устройств на ПЛИС на основе динамического перепрограммирования внутренней структуры // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2002. – № 3. – С. 31 – 35.

Поступила в редакцию 6.05.2004

Рецензент: д-р техн. наук., проф. В.А. Краснобаев, Харьковский государственный технический университет сельского хозяйства, Харьков.