

ИССЛЕДОВАНИЕ ВСТРОЕННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИКОЙ И СТРУКТУРНО-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ АДАПТАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

А.А. Ушаков, д.т.н., проф. В.С. Харченко

Проведен анализ требований к встроенным системам управления с программируемой логикой (ВСУПЛ) и путей их реализации. Оценена скорость падения вероятности безотказной работы ВСУПЛ при накоплении отказов. Предложен метод имитационного моделирования, основанный на структурно-пространственной модели представления ВСУПЛ как инструмента оценки и выбора конфигураций отказоустойчивых структур. Приведен пример исследования структурно-пространственной адаптации для одноканальной, дублированной и трехканальной мажоритарной структуры.

Введение. Отказоустойчивость является одним из наиболее значимых свойств необслуживаемых и критичных к отказам систем (аэрокосмической техники, информационно-управляющих систем, важных для безопасности АЭС). В качестве требований к современным структурам ВСУПЛ аэрокосмического применения, на основании анализа документов ИТТ, NASA [1], выделим следующие: возможность сохранения работоспособности при различных параметрах агрессивной среды; возможность обработки различных данных (обеспечивать контекстное переключение, усовершенствование алгоритмов данных и адаптацию после запуска); массово-габаритные, энергетические и стоимостные требования (возможность использования коммерческих COTS-компонентов).

Таким образом, для проектирования систем необходимо выбирать элементную базу, которая способна к функциональной и надежностной адаптации, с возможностью использования COTS-подхода и ядер интеллектуальной собственности. Такой элементной базой являются микросхемы ПЛИС (CPLD и FPGA). Эти микросхемы представляют собой структуры со смешанной зернистостью (возможностью реконфигурации на различных уровнях) [2, 3]. Их настройка возможна путем коммутации каналов связи на уровне элементов логических ячеек (таблиц перекодировки, триггеров, мультиплексоров и т.д.) и на уровне регулярной архитектуры ПЛИС (каналов, связующих логические ячейки, ячеек ОЗУ, выводов) [3]. Путем полной

или частичной реконфигурации можно выполнить их адаптацию к отказам. Номенклатура современных ПЛИС велика, а разработчику доступны библиотеки стандартных элементов как от производителей микросхем, так и от сторонних разработчиков. Проект на ПЛИС является программно-аппаратным комплексом, поскольку при его разработке используются пакеты САПР, и позволяет реализовать ВСУПЛ как систему на одном кристалле. Однако доступные САПР не поддерживают возможность надежностной адаптации ПЛИС, а также выбора наилучших конфигураций ВСУПЛ по показателю отказоустойчивости [4].

Цель статьи. Разработка методики имитационного моделирования ВСУПЛ и способа структурно-пространственной адаптации таких систем при кратных отказах их элементов.

Пространственная реконфигурация ВСУПЛ. Исследуем процесс изменения вероятности безотказной работы ВСУПЛ при накоплении отказов и реконфигурации при появлении отказов трех ячеек для CPLD микросхемы фирмы Xilinx XCR3032XL емкостью 32 макроячейки и 36 выводов. Распределение логических ресурсов ПЛИС между функциональными областями трех исследуемых структур представлено в табл. 1.

Таблица 1

Распределение ресурсов микросхемы между функциональными областями структур

Тип микросхемы	Число ячеек	Число выводов	Число логических ресурсов для функциональной области структуры
XCR3032XL	32	36	Канал обработки информации (25% от емкости микросхемы) – 8 ячеек
			Набор входов или выводов (15% от числа выводов) – 5 выводов
			Средства контроля, диагностирования и реконфигурации (25% от емкости канала обработки информации) – 2 ячейки
			Коммутатор каналов (50% от набора выводов) – 3 ячейки
			Мажоритарный орган (75% от набора выводов) – 4 ячейки

При моделировании рассматриваются 6 структур: одноканальные (structure 1 и structure 2), дублированные (structure 3 и structure 4) и трехканальные мажоритарные (structure 5 и structure 6). Структуры с одинаковым количеством каналов отличаются наличием общих (structure 1, structure 3, structure 5) или индивидуальных входов (structure 2, structure 4, structure 6) к каждой функциональной области структуры. Результаты расчетов, проведенных с помощью аналитической модели [5], представлены в табл. 2 и на рис. 1.

При реконфигурации с целью обхода отказавших элементов необходимо учитывать, что число возможных отказавших ячеек и эффективное

поле реконфигурации уменьшается. В том случае, если микросхема продолжает свою работу после реконфигурации, она начинает свою работу при единичной вероятности безотказной работы. Однако, при обнаружении следующего отказа вероятность сохранения безотказной работы будет меньше, чем при предыдущем отказе. Это обусловлено тем, что эффективная площадь микросхемы, т.е. площадь, доступная для расположения проекта, после каждого отказа и реконфигурации уменьшается. Таким образом, вероятность отказа ВСУПЛ, определяемая отношением числа отказов всех функциональных областей (величина постоянная) к числу отказов всей микросхемы (эта величина уменьшается), будет расти. Выражение для вероятности отказа канала при одиночных отказах будет иметь вид

$$P(E) = C_{CH} / (C_{CHIP} - N_{REC} \cdot N_{FAULTS}),$$

где C_{CH} – число отказов всех функциональных областей; C_{CHIP} – число отказов всей микросхемы; N_{REC} – номер реконфигурации, а N_{FAULTS} – число отказов, после которых проводится реконфигурация.

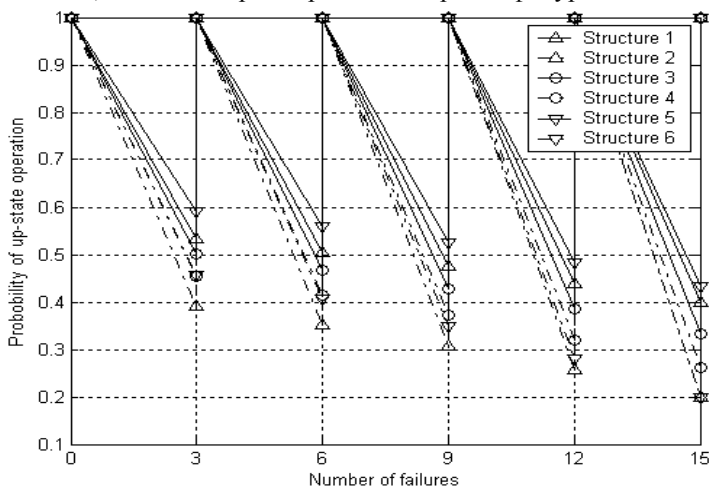


Рис. 1. Вероятность безотказной работы структур в процессе работы при реконфигурации после появления единичного отказа

Таблица 2

Вероятность безотказной работы после реконфигурации

Вероятность сохранения работоспособного состояния	Номер реконфигурации				
	1	2	3	4	5
P1	0,5331	0,5052	0,4739	0,4385	0,3982
P2	0,3907	0,3517	0,3076	0,2574	0,1997
P3	0,5001	0,4664	0,4283	0,3845	0,3341
P4	0,4541	0,4154	0,3713	0,3205	0,2616

P5	0,5920	0,5605	0,5243	0,4824	0,4334
P6	0,4567	0,4064	0,3480	0,2797	0,1991

Методика имитационного моделирования (МИМ). Вероятность безотказной работы при внезапных отказах может быть описана аналитическими зависимостями [5]. Однако их запись весьма трудоемка, так как ограничивается исходными данными о типе отказоустойчивой структуры, кратности отказа, законе генерации координат кластерных отказов. Имитационная модель представляет собой развитие концептуальной структурно-пространственной модели ВСУПЛ. МИМ, используя аппарат моделирования методом Монте-Карло, позволяет производить моделирование на любом наборе входных данных. Разработанный подход к генерации аналитических зависимостей для вероятности безотказной работы основан на допущении о прямоугольной геометрии функциональных областей структур. Имитационная модель позволяет изменять пространственные характеристики функциональных областей и отказов, производить оценку устойчивости структур для смеси кластеров (кратных отказов) различных конфигураций, вводить кластеры различных конфигураций для каждой области элементарных структур ПЛИС.

Предлагаемая модель является событийной, так как рассматривает реакцию системы на отказы. Если сгенерированный кластерный отказ попадает в функциональную область, она переходит в неработоспособное состояние. Затем оценивается влияние состояния этой области на состояние всей ВСУ, имплементированной в ПЛИС: в том случае, если неработоспособная область представляет собой нерезервированную часть структуры ВСУПЛ, то вся ВСУПЛ переходит в неработоспособное состояние. Факторами, влияющими на вероятность безотказной работы, выделены следующие: логическая емкость всей микросхемы; доля логической емкости микросхемы на реализацию отказоустойчивой структуры и доля ресурса на определенные функциональные области; конфигурация функциональных областей; взаимное расположение резервированных и нерезервированных областей в ПЛИС.

При имитационном моделировании вводится набор случайных величин (с.в.) [6]: с.в., описывающая множество возможных размерностей кластеров (т.е. выделяется наиболее вероятная размерность или выбирается закон генерации размерностей); с.в., описывающая распределение кластеров в этом множестве определенной размерности (выделяется наиболее вероятная конфигурация кластера определенной размерности или выбирается закон генерации конфигураций кластеров определенной размерности); с.в., определяющая координаты кластерного отказа.

Имитационное моделирование включает в себя два этапа. *Первый этап* – введение исходных параметров модели: размерности микросхемы и отдельных ее структурных элементов, распределение логической

емкости микросхемы между функциональными областями структур, настройка пространственного закона генерации кластеров. Распределение ресурсов производится путем перекодировки физической структуры ВСУПЛ, представленной в файле трассировки откомпилированного проекта, на логическую структуру, представляющую собой прямоугольное имитационное поле, состоящее из объектов отказа, которые, в свою очередь, представляют собой объединения некоторых структурных элементов ПЛИС. Для моделирования некоторого гипотетического проекта распределение ресурсов возможно путем, аналогичным представленным в аналитическом моделировании. *Второй этап* – проведение собственно имитационного эксперимента с заданной точностью и достоверностью.

Структурно-пространственная адаптация (реконфигурация) ВСУПЛ. На основании структурно-пространственной модели представления ВСУПЛ и метода имитационного моделирования предлагается структурно-пространственный метод адаптации ВСУПЛ к отказам различной кратности (пример такой адаптации для распределения ресурсов микросхемы согласно табл. 1 представлен на рис. 2).

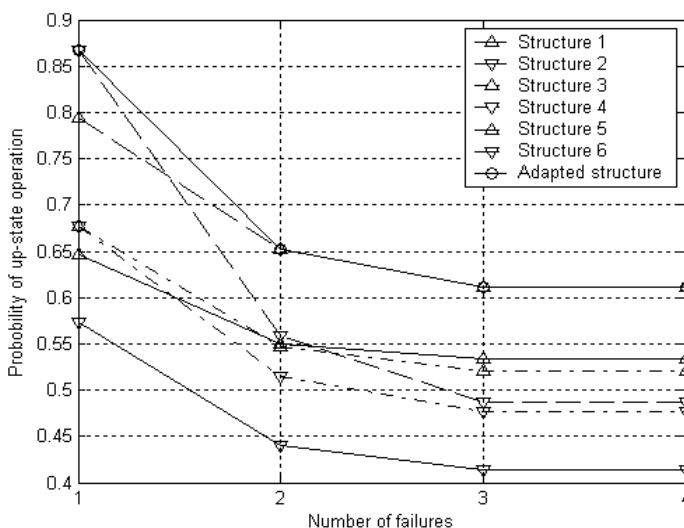


Рис. 2. Вероятность сохранения работоспособного состояния структур в процессе работы при реконфигурации после появления единичного отказа

От известных методов адаптации предлагаемый отличается тем, что адаптация осуществляется не только путем реконфигурации (пространственного перераспределения) функциональных областей структуры в обход отказов, но и выбором при реконфигурации структуры с наивысшим показате-

лем вероятности безотказной работы ВСУПЛ. Для заданного распределения ресурсов микросхемы ПЛИС между функциональными областями (т.е. для готового проекта одноканальной структуры ВСУПЛ) метод имитационного моделирования позволяет проводить выбор структур при фиксированной геометрии областей, а также выбор наилучшей конфигурации для каждой из структур. Как видно из графика рис. 2, целесообразно изначально конфигурировать систему в мажоритарную структуру с индивидуальным набором входов к каждой функциональной области. При обнаружении второго отказа целесообразно реконфигурировать ВСУПЛ к мажоритарной структуре с общим набором входов.

Выводы. В статье предложен метод структурно-пространственной адаптации ВСУПЛ при кратных отказах, а также средство ее поддержки – имитационная модель ВСУПЛ, устойчивых к таким отказам. Метод и модель позволяют производить надежностную адаптацию и выбор ВСУПЛ по наилучшей вероятности безотказной работы. Дальнейшее направление работ в данной области связано с созданием комплекса программно-технических средств, интегрированных в стандартные пакеты САПР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Weigand D., Harlacher M. *Design of a Radiation-Tolerant Low-Power Transceiver* // *Proceedings of MAPLD-2001 Conference*. – <http://klabs.org>.
2. Fekete S.P., Kohler E., Teich J. *Optimal FPGA Module Placement with Temporal Precedence Constraints* // *Proceedings of DATE-2001 Conference*. – 2001. – P. 658 – 667.
3. Lach J., Mangione-Smith W.H., Potkonjak M. *Enhanced FPGA Reliability through efficient run-time fault reconfiguration* // *IEEE transactions on reliability*. – September 2000. – Vol. 49, No. 3. – P. 296 – 304.
4. Baldacci S., Zolesi V. and others. *SEU Tolerant Controls for a Space Application based on Dynamical Reconfigurable FPGA* // *Proceedings of MAPLD-2003 Conference*. – <http://klabs.org>.
5. 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.
6. Якимец Н.В., Ушаков А.А. *Анализ типов отказов и разработка настраиваемого генератора отказов ПЛИС* // *Вестник НТУ «ХПИ»*. – 2003. – № 6. – С. 149 – 152.

Поступила 2.03.2004

УШАКОВ Андрей Александрович, аспирант кафедры компьютерных систем и сетей НАУ “ХАИ”, который окончил в 2001 году. Область научных интересов – отказоустойчивые встроенные системы управления с программируемой логикой, методы их моделирования и проектирования.

ХАРЧЕНКО Вячеслав Сергеевич, докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой ком-

пьютерных систем и сетей НАУ “ХАИ”. В 1974 году окончил ХВВКИУ. Область научных интересов – теоретические основы, методы проектирования и экспертизы компьютерных систем критического применения.