

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ

Введение

Развитие телекоммуникационных систем и сетей в мире испытывает важные революционные изменения, в основу которых положены новейшие технологические решения. В общем виде сеть – это объединенные системы объектов. Компьютерная сеть – это совокупность компьютеров, сетевых адаптеров, среды передачи данных, устройств управления передачей данных и периферийных устройств. Современные сети можно рассматривать как синтез двух исходно независимых сетей – телекоммуникационных и компьютерных. Логика развития телекоммуникационных систем требует применения цифровых систем передачи (ЦПС) и вычислительных средств для решения задач маршрутизации, управления установлением соединений, а логика развития вычислительной техники побуждает к большему использованию средств связи между периферийными устройствами и отдельными компьютерами. Требования, предъявляемые к системам телекоммуникации (СТ), сводятся к обеспечению высококачественной передачи, распределению, обработке и хранению разного вида информации, возможности управления со стороны пользователя, оперативного получения от сети ответных реакций, объединения и разделения ресурсов.

Международная организация стандартов ISO, анализируя опыт создания компьютерных сетей, разработала концепцию построения сетей, названную архитектурой открытых систем. В соответствии с этой концепцией создана протокольная модель, позволившая ввести международные стандарты, определяющие и регламентирующие создание систем и сетей, названная эталонной моделью взаимодействия открытых сетей X.200. Институт IEEE организовал комитет 802 по стандартизации локальных сетей, в результате работы которого было принято семейство стандартов IEEE 802.X, содержащих рекомендации по проектированию нижних уровней локальных сетей. Позже результаты работы этого комитета легли в основу комплекса международных стандартов ISO 8802-1 – 8802-5.

Функциональные свойства систем технического диагностирования (СТД)

Возрастание сложности современных телекоммуникационных систем влечет за собой необходимость обеспечения требуемого уровня отказоустойчивости, надежности, робастности, производительности и быстрой адаптации к классу решаемых задач. Надежность – это вероятность того, что система будет функционировать надлежащим образом в течение определенного промежутка времени. Надежность сети связи характеризует ее свойство обеспечить связь, сохраняя во времени значения установленных показателей качества в заданных условиях эксплуатации, отражает способность сохранять работоспособность сети связи при воздействии случайных отказов технических средств, вызываемых процессами старения, дефектами технологии изготовления или ошибками обслуживающего персонала.

Одним из эффективных путей достижения высоких показателей надежности телекоммуникационных систем является введение аппаратной, программной и временной избыточности, обеспечивающей их отказоустойчивость (свойство системы сохранять работоспособность при наличии в ней неисправностей определенного класса [1]).

Отказоустойчивость телекоммуникационной системы обеспечивается ее внутренними ресурсами путем использования аппаратно-программных средств диагностирования технического состояния и восстановления работоспособности системы при наличии отказов, дефектов обусловленных типов и кратности [2].

Основные этапы проектирования отказоустойчивой реконфигурируемой однородной сети: 1) определение класса неисправностей-дефектов, для которого обеспечивается свойство отказоустойчивости; 2) выбор алгоритмов и средств диагностирования, с помощью которых обнаруживается и локализуется определенный выше класс неисправностей; 3) выбор алгоритмов и средств автоматического восстановления работоспособности, которые осуществляют повтор отдельных участков управляющих программ, реконфигурацию системы и отключение НМ; 4) анализ и моделирование эффективности РВС с целью интерактивного улучшения проекта.

Известно, что затраты на генерацию тестов и моделирование неисправностей растут с увеличением размерности объектов диагностирования (ОД), рабочей частоты, числа выводов СБИС и печатных плат. Прогноз ряда ведущих фирм, занимающихся разработкой и производством современных СБИС, систем на одном кристалле или печатной плате, показывает, что к 2012 г. затраты на их проектирование и производство и стоимость средств технической диагностики (СТД) будут практически равны. Для СБИС с 1000 выводами стоимость СТД эквивалентна стоимости разработки кристалла [3].

Разнообразие ОД, их функциональные, структурные и конструктивные характеристики определяют особенности и специфику цифровых структур СТД, их форму и содержание, проектирование которых осуществляется на основе математических моделей ОД, выбора методов анализа моделей для определения работоспособности и контролируемых параметров ОД, класса обнаруживаемых и локализуемых дефектов. Наиболее ответственным и трудоемким этапом при проектировании и реализации СТД является построение математических моделей ОД, которые определяют состав информационно-измерительного оборудования, универсальных или специализированных систем, позволяющих реализовать достаточно сложные алгоритмы и процедуры диагностирования состояния ОД и восстановления работоспособности в соответствии с заданными характеристиками и параметрами отказоустойчивости ОД [4].

С целью снижения стоимости СТД и повышения эффективности современных вычислительных и информационно-управляющих систем ведущими зарубежными фирмами – производителями СОК, компьютеров и телекоммуникационных систем и сетей предложены рекомендации, которые представлены международными стандартами проектирования сложных систем: IEEE1149.1÷4 «Standard Test Access Port and Boundary-Scan Architecture» (стандартный тест-порт и архитектура граничного сканирования) и IEEE P1500 "Standard for Embedded Core Test» – стандарт встроенных средств ТД [5]. Введение этих стандартов проектирования сложных систем определяет новые подходы к построению и организации функциональных и тестовых средств диагностирования телекоммуникационных систем.

Под функциональным диагностированием (ФД) будем понимать диагностирование, осуществляемое во время функционирования ОД, на который поступают только рабочие воздействия, в отличие от тестового диагностирования (ТД), когда на ОД подаются тестовые воздействия, формируемые в процессе его проектирования с помощью специальных систем генерации тестов [6].

Издание журнала IEEE Design Test of Computers, December, 2004 посвящено проблеме верификации проектов сложных цифровых систем, создаваемых на основе современных субмикронных технологий. В публикациях ведущих специалистов крупнейших фирм производителей Synopsis, Intel, IBM Inc, Mentor Graphics и др., а также известных ученых в области технической диагностики R. Gupta, S. Malik, M. Hsiao, G. Micheli, I. Koren и др. обсуждается эффект синергизма при решении проблемы верификации цифровых систем. Эффект синергизма на этапе производства и эксплуатации достигается при создании ДО систем путем строгого соблюдения стандартов тестопригодного проектирования, сочетания функциональных и тестовых методов диагностирования неисправностей, использования статических и динамических методов верификации, встроенных средств диагностирования.

Можно выделить три типа задач, решаемых СТД: 1) проверка исправности ОД – ОД считается исправным, если в нем отсутствуют дефекты (неисправности). Диагностические эксперименты по проверке исправности являются наиболее сложными, так как включают полный комплекс испытаний для оценки исправности ОД; 2) работоспособности ОД – под работоспособностью ОД понимается возможность выполнять объектом заданные функции, сохраняя основные параметры в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Проверка работоспособности ОД является также достаточно трудоемкой, так как правильность выполнения заданных функций необходимо определять во всех режимах работы ОД. При этом допускается наличие неисправностей, которые не приводят к потере основных функций ОД; 3) правильности функционирования – правильность функционирования ОД выполняется в режиме функционального диагностирования и оценивает работоспособность объекта в данный момент реального времени, на который поступают только рабочие воздействия. При этом возможно наличие дефектов в системе, не проявляющихся в данном режиме работы при выполнении данного алгоритма функционирования.

Проверка правильности функционирования является оперативной проверкой работоспособности систем при выполнении определенной функции в текущем режиме работы и применяется для динамических объектов, работающих длительное время, для которых недопустимо даже кратковременное прерывание режима функционирования.

Наиболее полная проверка исправности или работоспособности ОД проводится в режимах профилактических испытаний путем тестового диагностирования, при котором на объект подаются тестовые воздействия – проверяющие тесты, позволяющие обнаружить неисправности, или тесты поиска дефектов, позволяющие определить место дефекта.

Классификация дефектов в телекоммуникационных системах

Причиной возникновения отказов в телекоммуникационных системах могут быть дефекты, допущенные при проектировании, производстве и ремонте, нарушения норм эксплуатации, воздействие окружающей среды, а также естественные процессы старения и изнашивания. Следует отметить, что дефекты, возникающие в устройствах и системах, некоторые авторы называют неисправностями [7].

Анализ современных технологий проектирования телекоммуникационных систем показывает, что ключевым подходом является проектирование «сверху – вниз». Каждому этапу проектирования соответствует уровень детализации и модель поведения системы, упорядоченные в следующей последовательности:

- поведенческая модель, в соответствии с которой система представляется в виде «черного ящика» с заданными вход-выходными соотношениями, техническими параметрами и ограничениями, характеризующими его поведение и свойства;
- функциональная модель, которая представляет собой управляющие потоки, алгоритмы их обработки и функциональные блоки системы и связи между ними;
- структурно-аналитическая модель, которая связана непосредственно с аппаратно-вентильной реализацией функциональных блоков системы, аналитическим описанием их функционирования, системами логических функций, структурными конечно-автоматическими моделями.

Уровни описания системы определяют характер и терминологию дефектов, соответствующих каждому уровню. На поведенческом уровне для обозначения дефекта общепринятым термином является ошибка, например ошибка величины отклонения параметра, коэффициента передаточной функции объекта, программная ошибка, ошибка четности управляющего вектора, ошибка передачи данных и др. На функциональном уровне «неисправности» и «ошибки» обусловлены дефектами программной реализации управляющих алгоритмов, искажениями автоматных диаграмм и таблиц истинности иерархических конечно-автоматных моделей функциональных узлов системы. На структурно-вентильном уровне дефекты обусловлены физическими изменениями в электронных компонентах, параметров

сигналов логических элементов, которые приводят к появлению неисправностей типа «константа 0 и 1», перепутывание связей, замыкание соседних линий и др.

Для каждого уровня описания поведения системы дефекты в большинстве случаев соответствуют изменению функций этого уровня описания. Это позволяет для значительного числа дефектов определить их формализованные модели. Причем число таких моделей оказывается существенно меньше количества самих дефектов и повреждений. В дальнейшем при определении модели дефекта будем использовать термины «ошибка» и «неисправность» [8].

В соответствии с критерием длительности неисправности разделяются на устойчивые и неустойчивые. Устойчивые неисправности вызываются необратимыми изменениями физического состояния элементов и узлов системы. Неустойчивые неисправности, которые могут появляться и исчезать в определенные периоды времени, разделяются на перемежающиеся неисправности и сбои. Перемежающиеся неисправности возникают вследствие взаимного влияния элементов схемы, которое возможно только при определенной комбинации состояний логических переменных, взаимодействии логических переменных, предельных режимов временной синхронизации и тактирования логических схем внешними возмущениями.

Сбои представляют собой неустойчивую неисправность, действие которой ограничено определенным максимальным интервалом времени. Причинами сбоев являются внешние наводки и кратковременные помехи, воздействие радиоактивного излучения на ячейки памяти, кратковременное изменение параметров элементов под влиянием изменений температуры, синхронизации и паразитных емкостных связей.

В соответствии с критерием размерности неисправности разделяются на одиночные и кратные. Неисправность одной логической переменной является одиночной. Произвольное сочетание одиночных неисправностей образует кратную неисправность. Кратная неисправность может возникать в результате появления одиночных неисправностей в критических элементах схемы, например в элементах синхронизации, источниках питания и др.

Статистический анализ, а также опыт промышленного использования телекоммуникационных систем на основе микроконтроллеров (МК) и микропроцессоров (МП) показывает, что в большинстве случаев отказы в них обусловлены неустойчивыми неисправностями перемежающегося типа и сбоями, возникающими в результате помех по цепям питания и внешними электромагнитными наводками [9].

В многоуровневых распределенных телекоммуникационных системах часто появляющиеся отказы связаны с классом оверлейных ошибок. Эти ошибки являются подмножеством неустойчивых программно-аппаратных ошибок, появляющихся в результате сбоев в процессе выборки данных из ОЗУ. При оверлейной организации управляющая программа МК разбивается на сегменты, которые попеременно загружаются в оперативную память. Возрастающие объемы и сложности управляющих программ, а также тактовых частот до $1 - 2 \text{ ГГц}$, приводят к ошибкам доступа к ОЗУ, когда данные одного оверлейного сегмента считываются (записываются) для другого. Экспериментальные исследования показали, что при наличии внешних возмущающих воздействий ошибки оверлейного типа составляют 78% всех ошибок обработки данных [10]. Исследования системных сбоев сотрудниками фирмы IBM показали, что оверлейные ошибки составляют половину всех системных отказов. Эти результаты показывают, что ошибки доступа к данным являются важным типом программно-аппаратных ошибок и обнаружение их в процессе функционирования систем управления с последующим восстановлением работоспособности системы является актуальной проблемой, решение которой позволит повысить характеристики отказоустойчивости.

Для обнаружения этого типа ошибок в [11] было предложено использовать специальные «указатели безопасности» данных, которые позволяли фиксировать моменты неправильного доступа к данным. Этот подход эффективно использовался в процессе отладки сложных управляющих программ. Однако, как показали исследования, программная избыточность,

вводимая с целью обнаружения ошибок доступа, снижает производительность системы более чем на 300%.

В работе [12] были предложены специальные коммерчески доступные программы, позволяющие обнаружить ошибки доступа к данным, которые основаны на использовании двухбитовых меток для каждого слова данных, что также приводит к увеличению оперативной памяти и снижению производительности системы на ~200%.

Анализ причин отказов в этой системе показывает, что сбои и перемежающиеся неисправности случаются значительно чаще, чем устойчивые отказы. Количественные соотношения между различными видами сбоев и отказами в различных процессорных модулях системы характеризуются данными.

Экспериментальные оценки количественных соотношений между перемежающимися и устойчивыми отказами системы в условиях производства совпадают с оценками исследований, приведенных в работах [10 – 12], подтверждающих, что 90% неисправностей в телекоммуникационных системах составляют неустойчивые неисправности.

Функциональное (он-лайнное) диагностирование телекоммуникационных систем

Функциональное (он-лайнное) диагностирование (ФД) – это процесс идентификации исправного состояния во время функционирования объекта, на который поступают рабочие воздействия. Размыкание обратных связей в проверяемой системе или подача тестовых воздействий, которые могут нарушить режим функционирования, считаются недопустимыми. К достоинствам ФД относятся его непрерывность и оперативность получения информации о правильности функционирования объекта и возможность восстановления работоспособности путем реконфигурации структуры системы без останова процесса.

Задаче проверки исправности телекоммуникационных систем в рабочем режиме посвящено большое число работ отечественных и зарубежных авторов. Это связано, в первую очередь, с трудностью ее решения, что обусловлено сложностью математического описания (дифференциальные, интегральные и разностные уравнения) ОД, наличием обратных связей, требованиями непрерывности процесса. К ним относятся разнообразные системы автоматического управления реальными объектами и процессами, которые могут быть непрерывными, импульсными или цифровыми, стационарными и нестационарными, детерминированными и стохастическими, с сосредоточенными или распределенными параметрами.

Создание единой теории и регулярных методов ФД для столь широкого круга объектов и процессов, разнообразия целей диагностирования, представляет собой сложную проблему, которая охватывает, как правило, отдельные из названных выше классов систем управления.

Анализ известных методов проверки правильности функционирования телекоммуникационных систем позволяет выделить два основных подхода к контролю за техническим состоянием объекта: контроль в пространстве параметров и контроль в пространстве сигналов.

В первом случае определяются текущие значения параметров объекта (коэффициенты передаточных функций, постоянные времени и т.д.) и оценивается отклонение их от номинального значения.

Во втором случае проверяется отклонение выходных сигналов объекта и его блоков от теоретических значений. В обоих случаях объект считается функционирующим неправильно, если отклонение превышает допустимую величину. Основная трудность при первом подходе связана со сложностью измерения текущих значений параметров, тогда как их номинальные значения обычно бывают известны. При втором подходе, напротив, главная проблема состоит в необходимости непрерывного определения номинальных значений выходных сигналов для текущих значений входных сигналов.

Методы диагностирования в пространстве параметров можно разбить на две группы.

Первая группа методов ФД в пространстве параметров использует результаты одного из разделов современной теории автоматического управления – теории идентификации. Однако целесообразно по-возможности упрощать применяемые методы, используя дополнительную

априорную информацию о номинальных значениях параметров исправного объекта и модели дефектов.

Математической основой второй группы методов, которые могут применяться и при диагностировании в пространстве сигналов, является теория распознавания образов. Текущее состояние объекта характеризуется вектором в пространстве диагностических признаков, которые разбиты на кластеры, соответствующие тем или иным дефектам. Эти кластеры частично перекрываются, и задача состоит в том, чтобы по измеренному значению вектора диагностических признаков указать наиболее вероятный дефект [11 – 12].

ФД динамических объектов в пространстве сигналов более точно соответствует содержательной цели проверки правильности функционирования объекта. В первую очередь это касается тех случаев, когда основное назначение динамического объекта состоит в том, чтобы преобразовывать входные сигналы в выходные. При диагностировании в пространстве параметров выполнение этой основной функции проверяется косвенно по значениям параметров объекта. При диагностировании же в пространстве сигналов правильность выработки выходных сигналов проверяется непосредственно путем их анализа. Отмеченная особенность является достоинством методов диагностирования в пространстве сигналов.

В первой из них используются априорно известные сведения о характеристиках сигналов (амплитуде, частотных свойствах и др.). К недостаткам методов этой группы относится необходимость иметь априорную информацию о характеристиках выходных сигналов, неизбежная зависимость указанных характеристик от входных сигналов, поведение которых заранее чаще всего неизвестно, и недостаточная полнота контроля.

От указанных недостатков свободна вторая группа методов, основанная на использовании алгебраических инвариантов. В методах этой группы диагностирование осуществляется путем проверки некоторых алгебраических соотношений (контрольных условий), которым должна удовлетворять совокупность выходных сигналов объекта, дополненная при необходимости одним или несколькими избыточными сигналами. Инвариантность контрольных условий состоит в том, что при отсутствии дефектов они обязаны выполняться для любых входных сигналов и в любой момент времени.

Проблема проверки правильности функционирования ОД в рабочем режиме на основе алгебраических инвариантов представляет значительный практический и теоретический интерес в развитии методов сигнатурного мониторинга для телекоммуникационных систем.

Множество дефектов в таких системах приводит к ошибкам, которые на информационном уровне можно разделить на три класса: 1) ошибки данных (МК изменяет данные в процессе обработки, записи, считывания и передачи); 2) ошибки кода операций, что приводит к выполнению другой команды; 3) ошибки программного перехода.

Использование *кодов*, обнаруживающих и корректирующих ошибки, при построении модулей ЗУ и при передаче данных от одного функционального модуля к другому является развитием и реализацией методов использования избыточных переменных и позволяет в большинстве случаев обнаружить и исправить ошибки первого класса. Для обнаружения ошибок второго и третьего класса в современных МК используются специальные ДП, проверяющие контрольные суммы микрокоманд или время выполнения линейных участков управляющих программ [8 – 11]. Методы сигнатурного мониторинга для ФД микроконтроллерных устройств широко используют при создании отказоустойчивых систем [12].

Как следует из анализа методов и архитектуры устройств ФД, к одному из наиболее эффективных методов решения проблемы сигнатурного мониторинга относится время-адресный метод диагностирования, а актуальной проблемой при создании отказоустойчивых и надежных систем управления процессом является разработка унифицированных программно-аппаратных средств, позволяющих сократить сложность и стоимость ДП и повысить их обнаруживающую способность.

Тестовое диагностирование телекоммуникационных систем на функционально-структурном уровне

Тестовое диагностирование (ТД) составляет основу процессов проверки исправности и работоспособности телекоммуникационных систем в период их отладки, запуска и профилактических работ. ТД может быть статическим и динамическим. ТД является статическим, если частота тестовых воздействий намного меньше частоты реальных воздействий в процессе рабочего функционирования. Динамическим называют тестирование на рабочей частоте ОД. Проверяющие тесты формируются (генерируются) на этапах разработки, проектирования и производства ОД. Каждому уровню проектирования соответствует диагностическая процедура и множество тестов, проверяющих работоспособность и правильное функционирование ОД. Каждый уровень описания определяет модели неисправностей и методы генерации тестов.

Классифицированы модели неисправностей структурно-логического (вентильного) уровня описания ОД с учетом влияния современных субмикронных технологий.

Детерминированные методы генерации обеспечивают формирование множества тестовых наборов, позволяющих обнаружить определенный класс неисправностей, а моделирование схемы на полученном множестве тестов определяет полноту обнаружения (полноту покрытия) множества неисправностей вычисленными тестами.

Исчерпывающий и псевдоисчерпывающий метод генерации заключается в подаче на входы ОД всех возможных наборов (векторов).

Псевдослучайный метод генерации заключается в подаче на входы ОД псевдослучайных тестовых наборов, формируемых сдвиговыми регистрами с обратными связями или аналогичными программными реализациями.

Так как для хранения эталонных результатов исправной схемы требуются большие объемы памяти, при тестировании используются различные способы сжатия эталонных и реальных реакций, получаемых в процессе тестирования. ТД со сжатием реакций называется компактным. Соответственно различают *компактное детерминированное*, *компактное псевдоисчерпывающее* и *компактное псевдослучайное тестирование*. В области генерации детерминированных тестов главная проблема заключается в создании эффективной компьютерной системы генерации тестов, обеспечивающих проверку исправности ОД большой размерности. Попытки создания таких систем ведущими фирмами-производителями СБИС показали, что такую систему полностью автоматической сделать невозможно, если не ввести определенные ограничения на проектируемое изделие, чтобы уменьшить сложность решаемой задачи. Считается, что эта проблема разрешима, если генерировать тесты только для комбинационных схем.

Проектирование ДУ в соответствии со стандартом IEEE 1149.1 позволяет свести процедуру ТД к проверке исправности комбинационной логики, так как исправность внутренних элементов памяти проверяется в процессе сканирования данных.

Известны оценки трудоемкости генерации множества детерминированных тестов и их эффективности путем использования систем моделирования неисправностей в зависимости от числа N эквивалентных вентилях схемы:

- число тестов, обеспечивающих покрытие 100% одиночных константных неисправностей $\sim O(N)$;
- затраты на генерацию этих тестов $\sim O(N^2)$;
- затраты на моделирование покрытия неисправностей методом дедуктивного моделирования $\sim O(N^2)$;
- полное время тестирования для ДУ со стандартом граничного сканирования $\sim O(N^2)$.

В работах известных специалистов ведущих зарубежных фирм и корпораций – разработчиков и производителей СБИС была предложена идея совмещения концепции встроенного самотестирования и стандарта проектирования IEEE1449.1 [8].

Этот стандарт определяет структуру ОД, в которой входные регистры функционируют в двух режимах: рабочем и тестовом. В тестовом режиме входные регистры реконфигурируются в сдвиговые регистры, что позволяет осуществить внешнее ТД через стандартный порт JTAG.

Идее совмещения встроенного самотестирования с действующим стандартом заключается в том, что в режиме самотестирования входные регистры реконфигурируются в генераторы тестов, а выходные регистры в синдромно-сигнатурные анализаторы выходных реакций проверяемой схемы, что в большинстве случаев позволяет осуществить ТД на рабочей частоте ОД.

В качестве генераторов тестов используются СРЛОС и СРНОС, а также одномерные сети клеточных автоматов. В качестве синдромно-сигнатурных анализаторов используются счетчиковые структуры на СРНОС и сигнатурные анализаторы на СРЛОС.

Метод исчерпывающего ТД КС основан на приложении к проверяемой схеме с n входами всех 2^n входных наборов, генерируемых на выходах СРЛОС или СРНОС. Это позволяет обнаружить неисправности КС комбинационного класса, которые не приводят к преобразованию КС в последовательную схему.

Главным достоинством такого подхода является исключение дорогостоящих и трудоемких процедур генерации проверяющих тестов и моделирования неисправностей. Простота генерации тестовых последовательностей с помощью счетчиковых структур, сдвиговых регистров с линейной обратной связью и клеточных автоматов в сочетании с эффективными методами сигнатурного сжатия выходных реакций КС позволяет осуществить процедуру проверки КС с использованием простых схем диагностирования.

В настоящее время ограничения, связанные с экспоненциальным ростом числа тривиальных тестов с увеличением размерности КС и числа ее входов, преодолеваются применением псевдоисчерпывающего тестирования КС.

Заключение

Проанализированы работы в области отказоустойчивости и тестопригодности телекоммуникационных систем. Дана классификация дефектов в телекоммуникационных системах. Проведено функциональное (он-лайновое) и тестовое диагностирование телекоммуникационных систем на функционально-структурном уровне.

Список литературы: 1. Аладьев В.З. Однородные структуры / Аладьев В.З. – К.: Техника, 1990. – 272 с. 2. Евреинов Э.В. Однородные вычислительные системы, структуры и среды / Евреинова Э.В. – М.: Радио и связь, 1981. – 208 с. 3. Прангшвили И.В. Параллельные вычислительные системы с общим управлением / Прангшвили И.В., Виленкин С.Я., Медведев И.Л. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с. 4. Палагин А.В. Реконфигурируемые вычислительные системы / А.В. Палагин, В.Н. Опанасенко. – К.: Просвіта, 2006. – 295 с. 5. Kaklamanis C.. Asymptotically Tight Bounds for Computing with Faulty Arrays of Processors (extended abstract) / C. Kaklamanis, A.R. Karlin // Proc. IEEE Symp. Foundations of Computer Science. – 1990. – P. 285-296. 6. Leighton F.T., Introduction to Parallel Algorithms and Architectures: Arrays, Trees, Hypercubes. San Mateo, Calif.: Morgan-Kaufmann. – 1992. 7. Leighton T. 'On the Fault Tolerance of Some Popular Bounded-Degree Networks' / T. Leighton, B. Maggs, R. Sitaraman // Proc. IEEE Symp. Foundations of Computer Science. – 1992. – P. 542 – 552. 8. Ajtai M. Fault Tolerant Graphs, Perfect Hash Functions and Disjoint Paths / M. Ajtai, N. // Proc. IEEE Symp. Foundations of Computer Science. – 1992. – P. 693 – 702. 9. Alon N. Explicit Construction of Linear Sized Tolerant Networks / N. Alon, F. Chung // Discrete Math. – 1988. – Vol. 72. – P. 15 – 19. 10. Bruck J. 'Wildcard Dimensions, Coding Theory and Fault-Tolerant Meshes and Hypercubes' / J. Bruck, R. Cypher, C. Ho // IEEE Trans. Computers – 1995. – Vol. 44. – P. 150 – 155. 11. Rosenberg A.L. 'The Diogenes Approach to Testable Fault-Tolerant Arrays of Processors' / A.L. Rosenberg // IEEE Trans. Computers. – 1983. – Vol. 32. – P. 480 – 489. 12. Rosenberg A.L. 'Fault-Tolerant Interconnection Networks: A Graph-Theoretic Approach' / A.L. Rosenberg // Proc. Ninth Workshop Graph-Theoretic Concepts in Computer Science. – 1983. – P. 286 – 297.с.

Харьковский национальный
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 02.02.2011