

На правах рукописи

КУДРЯВЦЕВ НИКОЛАЙ ГЕОРГИЕВИЧ

**МЕТОДЫ КОМПАКТНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ И САМОДИАГНОСТИКИ
ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ**

Специальность: 05.13.01 – Управление в технических
системах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 1995

Работа выполнена в НИИ автоматики и электромеханики при Томской государственной академии автоматизированных систем управления и радиоэлектроники

Научные руководители: Доктор технических наук,
профессор Бондаренко В.П.

Доктор технических наук,
профессор Матросова А.Ю.

Официальные оппоненты: Доктор технических наук,
профессор Разин В.М.

Кандидат технических наук,
Доцент Тюнина-Вульф Л.В.

Ведущее предприятие: организация Технотрон, г.Томск.

Защита состоится 20 сентября 1995 г. в ____ часов на заседании Диссертационного Совета Д 063.80.03 при Томском политехническом университете.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТПУ.

Ученый секретарь
диссертационного совета

И.Л.Чудинов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В процессе разработки, производства и эксплуатации технических устройств большое внимание уделяется вопросам их надежности, отказоустойчивости и ремонтпригодности. Одной из основных задач, с которой сталкиваются исследователи, работающие в данной области – это задача подготовки и проведения диагностического эксперимента, по результатам которого можно судить о корректности работы объекта диагностирования (ОД). Суть диагностического эксперимента заключается в нахождении и обеспечении таких условий функционирования ОД, чтобы по состояниям последующего устройства, наблюдаемым во время проведения проверяющих процедур, можно было принять решение о его исправности или неисправности, а в некоторых случаях и иметь возможность локализовывать обнаруженные неисправности.

В течение последнего времени наблюдается увеличение сложности выпускаемых технических устройств и систем, что влечет за собой повышение на несколько порядков трудоемкости решения задачи их анализа с целью подготовки и проведения тестового эксперимента. В связи с этим, наряду с аналитическими методами решения вышеперечисленных задач (моделирование неисправностей функционирования объекта и построение проверяющих и диагностических тестов) все большее место стали занимать способы и подходы структурно-технологического (контролепригодного) направления. Их суть заключается в разработке однородных и квазиоднородных структур, с возможностями самодиагностики, перестраиваемости и резервирования.

В связи с тем, что в регулярных структурах разрабатываемых при контролепригодном проектировании, появляется возможность раздельной проверки комбинационных блоков и блоков памяти, сложность решения задач контрольного и диагностического тестирования устройства уменьшается. Однако сама задача приобретает своеобразную специфику, которая связана с распределенностью комбинационных блоков в структуре исследуемого устройства. Последнее уменьшает пригодность использования классических тестов, т.к. это требует наличия аппаратуры подачи тестовых воздействий и отслеживания реакций для каждого субблока.

Одним из путей решения возникающей проблемы является использование методов компактного тестирования и самодиагностики. Суть этих методов заключается в возможности выделения таких параметров ОД, которые бы допускали компактное описание доследуемого устройства и позволяли судить о его техническом состоянии.

В некоторых работах уже делались попытки проведения исследований существующих методов компактного тестирования и самодиагностики. Однако область исследований существенно сужалась за счет того, что в качестве основного показателя компактности рассматривалось использование процесса преобразования (сжатия) информации о состоянии ОД (сигнатурный анализ, вероятностное тестирование и т.п.) и не принимались во внимание подходы, позволяющие получать компактную информацию о состоянии ОД другими путями, например посредством преобразования структуры объекта, изменения обрабатываемой устройством информации и т.п.

ЦЕЛЬЮ НАСТОЯЩЕЙ РАБОТЫ является исследование,

разработка, и реализация методов компактного тестирования и самодиагностики цифровых устройств.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ:

- исследование методов компактного тестирования и самодиагностики с целью выделения параметров, допускающих компактное описание ОД, позволяющих судить о техническом состоянии исследуемого устройства;
- нахождение способов компактного описания ОД для проведения стендовых диагностических процедур о элементах покомпонентного тестирования;
- разработка встраиваемых систем тестирования, совмещающих в себе функции одновременно генератора воздействий и анализатора реакций, и использующих для принятия решения об исправности ОД компактное описание исследуемого устройства;
- создание программно-аппаратных средств для исследований, отладки и реализации разрабатываемых диагностических процедур.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИИ. В работе использован аппарат булева дифференциального исчисления; аппарат теории конечных автоматов; аппарат теории кодирования; элементы общей алгебры; элементы комбинаторного анализа.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ состоит в том, что в результате исследований:

1. разработан новый метод компактного тестирования комбинационных автоматов, основанный на определении векторного коэффициента прозрачности;
2. предложен алгоритм нахождения коэффициентов прозрачности для модели ОД, основанный на ортогонализации

ДНФ прямой в инверсной булевых функций, входящих в формулу вычисления булевой производной;

3. разработан оригинальный метод определения коэффициента прозрачности для реального устройства;

4. разработана кольцевая технология самотестирования труднообнаружимых неисправностей;

5. показана связь для инициального автономного автомата, описывающего кольцевую систему тестирования, между кодовым расстоянием на множестве вершин, принадлежащих циклу в пространстве переменных, соответствующих контролируемым полюсам и кратностью обнаруживаемых константных неисправностей на этих полюсах.

6. доказано, что для любого комбинационного ОД может быть синтезирована кольцевая система тестирования, обнаруживающая на множестве контролируемых полюсов все одиночные константные неисправности;

7. предложен подход к решению проблемы выбора кратчайшего цикла инициального автономного автомата кольцевой системы, заключающийся в сведении задачи к анализу булевых матриц, не содержащих константных столбцов;

8. показана возможность использования кольцевой системы тестирования рассматриваемого класса для разработки и реализации встроенных средств самодиагностики микропрограммных автоматов.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ заключается в разработке кольцевой технологии самотестирования труднообнаружимых

неисправностей; разработке нового способа диагностирования комбинационных логических схем; создания системы экспериментального логического анализа, возводящей разрабатывать, исследовать и реализовывать различные диагностические процедуры.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. Результаты работы были использованы при разработке системы экспериментального логического анализа (СЭЛА), проводимой 18 отделом НИИ АЭМ, г. Томск; при разработке системы покомпонентного тестирования, выполнявшейся совместно 18 отделом НИИ АЭМ и мат. лабораторией НПО Контур, г. Томск; при проведении исследования по созданию комплекта НИКА для цифрового звукового кассетного магнитофона с вращающимися головками, выполнявшегося для ОКБ РЭА Томского радиотехнического завода; при разработке средств диагностики для системы сбора и обработки информации по нефтяным месторождениям, 18 отдел НИИ АЭМ г. Томск; при разработке учебных стендов и пособий для практических занятий по курсу "Основы цифровой техники" и курсу "Основы микропроцессорной техники", кафедра ОАСУ, ТАСУР.

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ. Результаты работы докладывались на: II Всесоюзной конференции "Микропроцессорные системы автоматики", г.Новосибирск, 1989 г.; Сибирской научно-технической конференции "Микропроцессорные системы контроля и управления", г.Новосибирск, 1992 г.; семинаре "Компактные методы тестирования и самодиагностики цифровых устройств", НИИ АЭМ, г.Томск, 1995 г.; семинаре "Кольцевая технология самотестирования труднообнаружимых неисправностей", СФТИ, г.Томск, 1995 г.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Она изложена на 127 страницах машинописного текста, включает 8 рисунков, 1 таблицу, список литературы из 168 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ рассматривается основной понятийный аппарат, использующийся при постановке и решении задач технической диагностики. Также определяется понятие технического состояния исправного и неисправного объектов диагностирования; понятие диагностического эксперимента и т.п.

Дается определение компактных методов тестирования и самодиагностики как методов, использующих компактное представление информации о техническом состоянии исследуемого цифрового устройства.

В основной части главы приводится классификация компактных методов тестирования и самодиагностики.

К первому классу относятся методы, которые требуют, для получения компактного представления информации о техническом состоянии ОД, введения в структуру устройства дополнительных аппаратных средств, преобразующих ОД в устройство, выполняющее отличный от первоначально заложенного в объект алгоритм функционирования.

В качестве представителей данного класса рассматриваются методы кольцевого тестирования.

Системы, реализующие методы кольцевого тестирования в большинстве случаев могут быть описаны системой уравнений:

$$\begin{cases} x_t(t+1) = f(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)) \\ x_{t+1}(t+1) = x_i(t) \end{cases}$$

где $s(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ – состояние автономного автомата в момент времени t . (при этом, автомат получается путем преобразования ОД, посредством введения сдвигового регистра, корректирующего устройства и обратной связи с выхода f на последовательный вход регистра).

$f(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ – нелинейная, в общем случае, булева функция.

$S = \{0, 1, \dots, 2^n - 1\}$ – множество состояний автомата.

$Z = \{0, 1\}$ – выходной алфавит.

$Z(t) = f(s(t))$;

$s(t+1) = 2 \cdot s(t) + f(s(t)) \pmod{2^n}$

К следующему классу относятся методы, которые требуют, для получения компактного представления информации, о технической состоянии ОД, введения в структуру проверяемого устройства дополнительных аппаратных средств, преобразующих ОД в объект, способный выполнять первоначально заложенный алгоритм и, при этом, обладающий такими функциональными параметрами, по оценкам которых появляется возможность принимать решение об исправности ОД.

В качестве примера представителей данного класса рассматриваются процедуры, использующие схемы встроенного контроля (СВК), самопроверяемые схемы встроенного контроля (ССВК) и т.п.

К третьему классу относятся методы, не требующие введения в структуру устройства дополнительных

аппаратных средств, а использующие либо альтернативную аппаратную реализацию ОД, либо предварительное изменение входной информации, таким образом, что любая ошибка из заданного класса должна преобразовывать результат выполняемой операции (из алгоритма функционирования ОД) к виду, распознаваемому в качестве некорректного (ошибочного).

К таким методам относятся диагностические процедуры, использующие метода контролепригодного проектирования, которые позволяют работать с представлением данных при помощи кодов, проверяющих и/или исправляющих ошибки и т.п.

К четвертому классу относятся методы, не требующие, введения в структуру устройства дополнительных аппаратных средств, а использующие индивидуальную способность ОД преобразовывать определенным образом организованную входную информацию.

В качестве примеров рассматриваются: процедуры вероятностного тестирования; сигнатурного и синдромного анализа; методы, использующие оценки силовых параметров ОД; методы дефектоскопии кристалла; методы оценки задержки прохождения сигнала в цепях ОД и т.п.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ (п.2.1) рассматривается булево дифференциальное исчисление. Даются определения булевой производной и функции чувствительности булевой функции в произвольной вершине гиперкуба.

Приводятся формулы нахождения и формулы связи булевых производных и функций чувствительности высших порядков.

Далее описывается разработанный в результате исследований способ компактного тестирования, заключающийся во введении и использовании векторного коэффициента прозрачности $(K_1, \dots, K_n)$ комбинационного автомата, моделью компонент которого может служить функция чувствительности (булева производная первого порядка) .

Суть предложенного подхода состоит в том, что каждая компоненте K_i данного вектора показывает зависимость контролируемого полиса от одного из входных полюсов. Она выражается в количестве единичных конъюнкций СДНФ булевой производной по соответствующей входной переменной (производная вычисляется для функции контролируемого полиса) .

В случае векторного представления булевой производной 1-ая компонента коэффициента прозрачности $(K_1, \dots, K_n)$ может быть вычислена следующим образом:

$$K_i = \frac{1}{2} \sum_{t=0}^{n-1} df / dx_i$$

Если булева производная представлена в виде ортогональной ДНФ (ортогональность требуется для того, чтобы количество конъюнкций ДНВ однозначно соответствовало количеству конъюнкций СДНФ), то 1-ая компонента коэффициента прозрачности совпадает с величиной Z_i .

$$Z_i = \sum_{i=1}^n 2^{n-r_i} ,$$

где r_i - ранг конъюнкции; n - число переменных без переменной дифференцирования); 1 - количество конъюнкций в ортогональной ДНФ частной производной булевой функции

по 1-ой переменной.

В п. 2.3. формулируется и доказывается теорема:

Если $\bar{F}$ и F – ортогональные ДНФ, то dF/dx_i – также ортогональная ДНФ.

В п. 2.4. приводится методика вычисления многомерных коэффициентов прозрачности и заполнения эталонных таблиц.

В качестве одной из сфер приложения данного подхода приводится решение задачи выходного контроля при производстве изделий цифровой техники. Эта задача ставилась и решалась в процессе выполнения совместных работ 18 отдела НИИ АЭМ и мат. лаборатории НПО Контур по разработке программно- аппаратных средств диагностики цифровых узлов станков с ЧПУ.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ рассматривается один из подходов к обеспечению самотестирования дискретных устройств, основанный на применении кольцевой системы тестирования КМ класса. Предлагаемый подход ориентирован на тестирование трудно обнаружимых константных неисправностей на полюсах элементов дискретного устройства. Кольцевая система реализует автономный автомат, который может быть описан системой уравнений:

$$\begin{cases} q_1(t+1) = g_1[f_1(q_1(t), \dots, q_k(t)), \dots, f_n(q_1(t), \dots, q_k(t))] \\ \dots \\ q_k(t+1) = g_k[f_1(q_1(t), \dots, q_k(t)), \dots, f_n(q_1(t), \dots, q_k(t))] \end{cases}$$

где $S(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t))$ - состояние автономного автомата КМ в пространстве переменных q в момент времени t .

Структура автономного автомата состоит из последовательно соединенных объекта диагностирования и корректирующего устройства (КУ), образующих комбинационную часть автомата.



Выходы проверяемых полюсов объекта диагностирования (ОД) поступают на входы КУ. Память автомата представлена буферным регистром. КУ синтезируется таким образом, чтобы любая одиночная константная неисправность проверяемых полюсов приводила к выходу автомата из реализуемого им цикла.

В этой же главе вводится понятие R-множества векторов, т.е. множества таких векторов, которые не содержат компоненты, принимающей одинаковое значение для всех векторов, принадлежащих данному множеству.

Далее доказывается, что неисправность $0(1)$ на любом контролируемом полюсе ведет к изменению хотя бы одного вектора из любого R -подмножества множества реакций ОД в пространстве переменных q .

Формулируется и доказывается теорема о том, что достаточным условием обнаружения любой константной неисправности кратности $r-1$ на контролируемых полюсах ОД является существование подмножества векторов реакций ОД в пространстве переменных q , которое было бы R -множеством с кодовым расстоянием равным r .

Далее доказывается, что для любого комбинационного ОД и любого множества полюсов $q_1 \dots q_R$, описываемых нетривиальными функциями, существует такое подмножество векторов реакций в пространстве переменных q , которое будет R -множеством с кодовым расстоянием большим или равным двум.

Большое внимание уделяется проблеме выбора кратчайшего цикла автономного автомата кольцевой системы, поскольку сокращение длины цикла приводит к уменьшению времени тестирования и упрощению структуры корректирующего устройства (снижению аппаратной избыточности при самотестировании). Проблема выбора кратчайшего цикла сводится к анализу булевых матриц, не содержащих константных столбцов.

Приводится процедура синтеза КУ для выбранного цикла и процедура тестирования.

В конце главы рассматриваются условия создания на основе предлагаемой кольцевой системы встроенных средств тестирования микропрограммных конечных автоматов.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ приводятся основные принципы построения и реализации системы экспериментального логического анализа (СЭЛА), представляющей из себя набор программно-аппаратных средств, при помощи которых можно разрабатывать компактные методы тестирования и самодиагностики, а также проводить их исследования и испытания в реальных условиях диагностического эксперимента. Кроме того, данная система может быть полезна не только на стадиях разработки и отладки цифровых устройств и специальных диагностических процедур, но и для автоматизации процедур выходного контроля при производстве цифровых устройств. Система может эффективно использоваться в процессе проведения практических занятий по изучению основных принципов функционирования синхронных и асинхронных цифровых автоматов с памятью и т.п.

Рассматриваются программные средства системы СЭЛА, которые представляют из себя два типа программных модулей. Первый блок программных модулей обеспечивает пользовательский интерфейс при задании диагностического эксперимента и при наблюдении результатов отслеживания. Второй блок является набором различных прикладных программ, реализующих алгоритмы нахождения булевых производных и функций чувствительности, нахождения покрытий булевых матриц, программ, выполняющих функции логического моделирования комбинационных автоматов и т.п.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

В процессе проведения работ по исследованиям и разработке программно-аппаратных средств компактного тестирования цифровых устройств были получены следующие

результаты:

1. Показана связь (для инициального автономного автомата, описывающего кольцевую систему тестирования) между кодовым расстоянием на множестве вершин, принадлежащих циклу в пространстве переменных, соответствующих контролируемым полосам и кратностью обнаруживаемых константных неисправностей на этих полюсах.

2. Разработана кольцевая технология самотестирования труднообнаружимых неисправностей.

3. Доказано, что для любого комбинационного ОД может быть синтезирована кольцевая система тестирования, обнаруживающая на множестве контролируемых полюсов все одиночные константные неисправности.

4. Предложен подход к решению проблемы выбора кратчайшего цикла инициального автономного автомата кольцевой системы, заключающийся в сведении задачи к анализу булевых матриц, не содержащих константных столбцов.

5. Показана возможность использования кольцевой системы тестирования рассматриваемого класса для разработки и реализации встроенных средств самодиагностики микропрограммных автоматов.

6. Разработан способ диагностирования комбинационных логических схем (Патент 2017207 Россия, МКИ⁵ G 06 F 11/00, заявленный 22.1.91, опубликованный 30.7.94 Бюл. N14), заключающийся во введении и использовании векторного коэффициента прозрачности комбинационного автомата, моделью компонент которого может служить функция чувствительности по определенной совокупности переменных (или частная производная булевой функции первого порядка). Каждая компонента данного вектора

показывает зависимость контролируемого полюса от одного из входных полюсов.

7. Разработана система экспериментального логического анализа (СЭЛА), позволяющая в процессе проведения диагностических экспериментов:

- производить отслеживание логических состояний исследуемых устройств в широком диапазоне частот, как в синхронном, так и в асинхронном режимах;
- задавать и генерировать тестовые воздействия;
- обеспечивать сопряжение воздействующих и отслеживающих субблоков системы с различными типами шин, внутренних и внешних полюсов объектов диагностирования;
- задавать, редактировать и хранить условия диагностических экспериментов;
- отображать в различных видах и производить статистическую обработку, полученных в процессе эксперимента данных.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кудрявцев Н.Г. Модуль адаптера общей шины типа Q. // Тезисы II Всесоюзной конференции "Микропроцессорные системы автоматики", Новосибирск, 1989 г., с. 43 - 44.
2. Кудрявцев Н.Г. Об одном подходе к обнаружению неисправности в комбинационной схеме. // Автоматика и вычислительная техника, 1991 г. №6, с. 63-67.
3. Кудрявцев Н.Г. Способ диагностики комбинационных логических схем - Патент 2017207 Россия, МКИ⁵ G 06 F 11/00, опубликованный 30.7.94 Бюл. №14, заявленный 22.1.91, решение о выдаче патента №4953646/24 от 8.04.92г.
4. Андреев Ю.А., Кудрявцев Н.Г., Использование систем

логического анализа для реализации вероятностных и компактных методов тестирования микропроцессорных устройств // Сибирская научно-техническая конференция "Микропроцессорные системы контроля и управления", Новосибирск, 10-11.09.92 г.