

На правах рукописи

Миронов Сергей Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СОКРАЩЕНИЯ
ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

01.01.09 — дискретная математика и математическая кибернетика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов — 2008

Работа выполнена на кафедре математической кибернетики и компьютерных наук ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского».

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор
Сперанский Дмитрий Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Твердохлебов Владимир Александрович

кандидат физико-математических наук,
доцент
Богомоллов Алексей Сергеевич

Ведущая организация: Институт проблем управления РАН

Защита состоится «25» декабря 2008 в 16 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета ДМ212.243.15 при Саратовском государственном университете им. Н. Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская 83, IX корп.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке Саратовского государственного университета.

Автореферат разослан «24» ноября 2008 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент

В. В. Корнев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современные цифровые устройства (ЦУ) состоят из отдельных блоков (чипов), которые, как правило, не подлежат ремонту, а просто требуют их замены в случае отказа на исправные. В связи с этим задача локализации неисправностей с точностью, превышающей указание конкретного отказавшего блока (чипа), не имеет смысла. Вместе с тем задачи локализации неисправностей с высокой точностью остаются актуальными в условиях массового промышленного производства тех же блоков (чипов). Причина этого заключается в больших экономических потерях производителя в случае, если в процессе производства возникают отклонения, приводящие к массовому браку. Именно поэтому в любой технологический процесс современного производства ЦУ этап диагностирования изделий включается в качестве обязательного. При этом точность локализации неисправностей должна быть достаточно высокой, поскольку это позволяет выявить место в технологической цепочке производства, служащее источником брака.

Даже небольшие остановки процесса массового производства несут значительные убытки производителю. Поэтому разработка таких эффективных процедур диагностики одного отдельного типа изделия, которые по времени не превышают заранее заданного лимита, является очень актуальной задачей. Очевидно, что упомянутые процедуры должны быть адаптированы к конкретному типу изделия, поскольку рассчитывать на создание эффективной универсальной процедуры диагностики не приходится. Из сказанного следует, что в силу бесконечного разнообразия производимых цифровых изделий упомянутая проблема будет постоянно оставаться открытой.

Одно из перспективных направлений существенного сокращения временных затрат на диагностику изделия с высокой точностью локализации неисправностей связано с использованием предварительно подготовленной диагностической информацией (ДИ) в виде так называемых словарей неисправностей. Различные варианты построения таких словарей были предложены в работах таких отечественных и зарубежных ученых как Шаршунов С. Г., Чипулис В. П., Тулосс Р. Э., Райан П. Г., Фукс В. К., Померанц И., Редди С. М., Ларраби Т. и другие.

Предложенный Чипулисом В. П. метод сокращения ДИ с использованием словарей неисправностей, порожденных масками, представляется наиболее естественным решением. Действительно, диагностирование с использованием таких словарей гармонично вписывается в технологический

процесс, так как не требует задержек после подачи на вход проверяемого устройства очередного тестового набора. Кроме того, объем такого словаря достаточно мал по сравнению с объемом полной ДИ.

Использование такого подхода осложняется отсутствием эффективных алгоритмов как для поиска единой маски, так и для поиска совокупности индивидуальных масок, а следовательно и метода создания такого словаря.

Из сказанного выше вытекает необходимость разработки эффективных подходов к поиску единых и индивидуальных масок, с использованием которых создаются соответствующие словари неисправностей. Данной проблеме были посвящены работы Вознесенского С. С., Малышенко Ю. В., Раздобреева А. Х., Сперанского Д. В., Шатохиной Н. К.

Отметим, что для решения проблемы сокращения ДИ очень хорошо зарекомендовало себя использование сигнатурных анализаторов, которые используются в основном при контроле систем. Теоретическое обоснование применения таких анализаторов и описание процесса диагностирования с их использованием было осуществлено в работах Фрооверка Р. А., Смирнова Н. И., Смита Дж. Э., Сагаловича Ю. Л., Ярмолика В. Н., Столова Е. Л., Иоффе М. И. и других. Основным достоинством таких анализаторов является простота их схемной реализации и, как следствие, высокая скорость работы. Указанные достоинства делают весьма привлекательной возможность использования сигнатурных анализаторов для решения задач локализации неисправностей. Более того, речь идет о разработке анализаторов, пригодных для получения компактных словарей неисправностей, обладающих такой же разрешающей способностью, что и исходная полная ДИ.

Предметом исследования являются математические аспекты эффективной организации процессов контроля и диагностирования современных сложных ЦУ в условиях их производства и эксплуатации.

Цель работы — разработка методов сокращения ДИ, представленной в виде словарей неисправностей.

Для достижения указанной цели в диссертации поставлены и решены следующие задачи:

- разработка эффективных подходов и алгоритмов поиска единых и индивидуальных масок, с использованием которых создаются соответствующие словари неисправностей;
- разработка методов, позволяющих производить максимальное сокращение ДИ без потери разрешающей способности;

- оценка эффективности, а также временной и емкостной сложности предложенных алгоритмов сокращения ДИ для реальных цифровых устройств.

Методы исследования. В работе использованы методы и математический аппарат теории управления, теории алгоритмов, теории информации, теории сложности вычислений, теории генетических алгоритмов и технической диагностики ЦУ.

Научная новизна результатов. В работе впервые получены следующие результаты:

- разработаны алгоритмы для поиска единых масок и совокупностей индивидуальных масок, базирующиеся на использовании эволюционных методов;
- разработан жадный алгоритм для поиска единой маски, который применим как для решения задачи минимизации ДИ, так и для решения задачи оптимизации ДИ;
- разработан жадный алгоритм поиска совокупности индивидуальных масок для решения задачи минимизации ДИ;
- предложен новый подход к сокращению ДИ, базирующийся на применении хеш-функций и обеспечивающий высокую степень сжатия ДИ без потери разрешающей способности диагностирования.

Все результаты, вошедшие в диссертационную работу, полученные соискателем, являются новыми и строго доказанными.

Практическая ценность полученных результатов. Полученные результаты могут быть использованы для эффективной организации процессов контроля и диагностики современных ЦУ в условиях их массового производства и эксплуатации.

Исследования по диссертационной работе проводились в соответствии с планами научных исследований кафедры математической кибернетики и компьютерных наук Саратовского государственного университета, в том числе по разделу «Разработка методов сокращения диагностической информации (ДИ) при тестировании дискретных устройств» темы «Разработка и применение фундаментальных методов исследования задач математического анализа, дифференциальных уравнений, дискретной математики, теории упругости и газодинамики» (шифр "Интеграл") (тем. план НИР СГУ, выполняемый по ЕЗН), теме «Исследование проблем анализа, синтеза и диагностик дискретных систем с использованием моделей конечных автоматов и графов» (тем. план НИР, выполняемый по §47), теме

«Разработка методов обеспечения отказоустойчивости и построение тестов для дискретных технических систем при наличии внешних возмущений и неопределенности в задании параметров» (грант РФФИ №05-08-18082).

Личный вклад. Все научные результаты, вошедшие в диссертационную работу, получены ее автором лично и самостоятельно. В совместных публикациях научному руководителю принадлежат все постановки задач и идеи методов их решения, соискателю — детальная разработка алгоритмов решения соответствующих задач, доказательства теорем, проведение численных экспериментов для оценки эффективности предложенных алгоритмов.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались и обсуждались на:

- Школе-семинаре «Перспективные системы управления на железнодорожном, промышленном и городском транспорте» (Алушта, 2006);
- Второй Международной научно-технической конференции «Dependable Systems, Services & Technologies» (Кировоград, 2007);
- Международной научной конференции «Компьютерные науки и информационные технологии», посвященной памяти профессора А. М. Богомолова (Саратов, 2007);
- Международной конференции «Крымская осенняя математическая школа-симпозиум» (Симферополь — Севастополь, 2007, 2008);
- Пятом Международном симпозиуме «East-West Design & Test Symposium» (Ереван, 2007);
- Шестой Международной конференции «Computer-Aided Design of Discrete Devices» (Минск, 2007).

Публикации. По результатам работы опубликовано 8 статей, 3 из которых опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Положения, выносимые на защиту.

- генетический алгоритм для решения задач минимизации и оптимизации ДИ с помощью единой маски;
- генетические алгоритмы для решения задачи минимизации и оптимизации ДИ с помощью совокупностей индивидуальных масок;
- жадный алгоритм для поиска единой маски;
- жадный алгоритм поиска совокупности индивидуальных масок;
- метод сокращения ДИ с помощью хеш-функций.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографии, включающей 87 наименований. Диссертация изложена на 113 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определена ее цель, описана структура диссертации и приведены основные понятия и определения предметной области.

Первая глава диссертации посвящена обзору работ по общим методам сокращения ДИ, а также методов, ориентированных на применение специальной аппаратуры. В пункте 1.1 приводится описание состава полной диагностической информации при тестовом диагностировании и рассматриваются аспекты ее использования, детально рассматривается представление ДИ в виде таблицы функций неисправностей (ТФН), описывается принцип организации словаря полной реакции (СПР). Отмечается необходимость сокращения объема полной ДИ и рассматриваются основные технологии, направленные на достижение такого сокращения. Одна из технологий, представляющая собой совокупность методов сокращения ДИ, связанных, в основном, с проектированием систем встроенного тестирования, — методов компактного тестирования, более детально рассматривается в п. 1.2.

Вторая глава диссертации содержит описание способов представления ДИ в виде различных типов словарей неисправностей и их применения при диагностировании ЦУ. Так, рассмотрены принципы построения словарей неисправностей, предложенных Тулоссом Р. Э., Ларраби Т., Бопана В., Фуксом В. К., Померанцем И. и др., в которых уменьшение объема достигается вследствие специальной организации информации, представленной СПР. Проведено исследование словарей неисправностей, предложенных Шаршуновым С. Г., Чипулисом В. П., Лаво Д., Арсланом Б., Ораилоглу А. и др., в которых происходит дополнительное сокращение информации за счет частичной потери диагностического разрешения. Здесь также описывается метод сокращения диагностической информации, предложенный Чипулисом В. П., базирующийся на использовании масок. Напомним основные аспекты данного метода.

Назовем точкой проверки пару

$$\langle \text{номер тестового воздействия} \rangle : \langle \text{выход} \rangle.$$

Тогда маской h назовем любую совокупность точек проверки. Пусть S — множество технических состояний, и пусть имеется некоторое разбиение этого множества, а S_j — элементы этого разбиения. Поставим в соответствие каждому множеству S_j некоторую маску h_j . Множество всех h_j обозначим H . Построим по СПР и множеству масок H таблицу следующим

образом. Каждая строка таблицы соответствует техническому состоянию. Содержимое строки таблицы, соответствующей состоянию $s_i \in S_j$, будут составлять значения точек проверки из h_j , взятые из строки СПР, соответствующей s_i , в порядке их следования в СПР. Построенную таким образом таблицу будем называть СПР_H , что означает «словарь полной реакции, построенный по маскам из H ». Маску h_j будем называть индивидуальной маской для каждого состояния из S_j , а множество H — множеством индивидуальных масок. Если $|H| = 1$ и $h \in H$, то маску h называют единой маской.

Третья глава диссертации посвящена разработке новых алгоритмов поиска масок, базирующихся на использовании эволюционных методов.

В п. 3.1 рассмотрены задачи, касающиеся сокращения ДИ с помощью масок:

1. Для каждого технического состояния s_i найти такую индивидуальную маску h_i (единую маску h), чтобы объем СПР_H был минимальным и разрешающая способность диагностирования с помощью СПР_H не изменялась по сравнению с разрешающей способностью диагностирования с помощью СПР.
2. Для каждого технического состояния s_i найти такую индивидуальную маску h_i (единую маску h), чтобы объем СПР_H не превышал заданной величины Z и изменение разрешающей способности диагностирования с помощью СПР_H по отношению к разрешающей способности диагностирования с использованием СПР было минимальным.

Первую из этих задач называют задачей минимизации ДИ при помощи масок, вторую — задачей оптимизации ДИ при помощи масок.

В п. 3.2 предлагаются и исследуются генетические алгоритмы для решения сформулированных задач. Для этого определена структура хромосомы, введены соответствующие фитнес-функции, определены используемые операторы селекции, кроссовера и мутации.

Введем следующие обозначения. Пусть K — число этапов эволюции, реализуемых ГА, M — число особей в популяции, W — объем памяти (в битах) для хранения одной особи. Тогда справедлив следующий результат.

Теорема 1. *Алгоритмическая сложность одного запуска предложенного генетического алгоритма равна $O(KM \cdot (W \cdot |S| + \log M))$, а объем памяти, необходимой для работы генетического алгоритма, равен $O(2MW)$.*

Для демонстрации эффективности предложенных генетических алгоритмов были проведены численные эксперименты.

Во всех численных экспериментах, проведенных для оценки эффективности сконструированных ГА, начальная популяция формировалась из особей, генерируемых с использованием датчиков случайных величин. Что касается размера популяции, то он подбирался опытным путем с целью ускорения сходимости к искомому решению.

На втором этапе ГА, связанном с подбором (селекцией) особей для скрещивания, были опробованы различные методы: турнирный отбор, отбор отсечением, пропорциональный отбор, а также отбор линейным и экспоненциальным ранжированием.

Для репродукции особей опробовались операторы одноточечного, многоточечного, однородного и булева кроссовера.

Наряду с классическим оператором мутации, когда в случайно выбранной позиции хромосомы особи производится ее инверсия, использовался и специально разработанный оператор, сохраняющий объем маски. Последний применялся при решении задачи оптимизации ДИ.

На пятом этапе ГА для формирования следующего поколения из особей текущего поколения, а также полученных после скрещивания потомков, был использован метод элитного отбора.

Наконец, в качестве условий окончания процесса работы сконструированных простых ГА использовался критерий достижения заданного предельного числа этапов эволюции.

Так, в табл. 1 приводятся данные об эффективности применения разработанного простого ГА для минимизации ДИ при помощи единой маски. Эти данные были получены на PC Pentium III, 1024 MHz, 256 MB RAM, при использовании оператора отбора линейным ранжированием и оператора булева скрещивания. В первых слева трех столбцах этой таблицы

Таблица 1. Результат поиска единой маски с помощью ГА

$ S $	Объем полной реакции, бит	Объем ДИ, бит	Объем маски, бит	Время работы ПГА	Доля сокращенной ДИ от полной ДИ
127	40	5 080	9	48 сек	22.5%
511	256	130 816	12	6 мин	4.68%
1023	512	523 776	18	12 мин	3.51%
2047	1024	2 096 128	19	2 час 7 мин	1.85%
4095	1024	4 192 256	24	15 час	2.34%

представлена информация об объеме вариантов исходных данных для ГА, а последние три столбца отражают характеристики полученного решения.

Величина $V(h)$ в последнем столбце табл. 1 показывает долю объема сокращенной ДИ от объема исходной ДИ.

Заметим, что на поиск сравнимого по объему решения методом полного перебора было затрачено более суток даже для исходных данных, представленных первой строкой табл. 1.

В процессе проведения расчетов было эмпирически установлено, что оптимальная численность популяции для предложенных ПГА — 100 особей, а для получения приемлемого решения достаточно 70 поколений.

В п. 3.2.2 рассматриваются возможности распараллеливания генетического алгоритма. Наиболее трудоемким этапом в ПГА для поиска маски является получение результата фитнес-функции для каждой хромосомы. В проведенных нами экспериментах была сделана попытка достичь простого ускорения этого этапа, производя вычисления фитнес-функции одновременно для нескольких хромосом. На первом этапе были проведены исследования ускорения ГА при использовании многопроцессорных ЭВМ. Результаты, приведенные в табл. 2, были получены на ЭВМ с ЦП Intel Core2Duo 2,33ГГц, 2 Гб ОЗУ. Эксперименты проводились для ДИ полученной для ДУ из каталога ISCAS'85 и ISCAS'89 при моделировании одичных неисправностей с помощью тестовых последовательностей НТЕС. Была взята численность популяции — 900 особей, а процесс эволюции прерывался при достижении 300 поколений.

Таблица 2. Ускорение работы генетического алгоритма при использовании двух процессоров

Схема	Объем ДИ, бит	Время работы алгоритма с использованием одного процессора	Время работы алгоритма с использованием двух процессоров
S298	343896	7 мин 16 с	4 мин 03 с
S344	336677	17 мин 11 с	9 мин 44 с
S526	1883172	23 мин 30 с	14 мин 03 с

Из приведенных в этой таблице данных следует, что при распараллеливании ГА в системе, имеющей два процессора, время работы алгоритма сокращается практически вдвое.

Также были поставлены эксперименты по поиску масок с помощью ГА на многомашинных системах. В экспериментах использовались 4 базовых ЭВМ со следующими характеристиками: ЦП Intel Pentium D 2.8 ГГц (2 ядра), 1 Гб ОЗУ, которые были объединены в локальную вычислительную сеть с пропускной способностью 100 Мбит/сек. Результаты этих экспериментов приведены в табл. 3. Данные из этих таблиц были получены при количестве этапов эволюции — 300 поколений и численности популяции:

Таблица 3. Ускорение работы генетического алгоритма на многомашиных системах

Схема	Объем ДИ, бит	Время работы алгоритма с использованием одной двухпроцессорной машины	Время работы алгоритма с на четырех двухпроцессорных машинах	Ускорение
S1488	30232800	4 час 10 мин	1 час 14 мин 57 с	3,33
C499	5799680	53 мин 17 с	17 мин 41 с	3,01
C1355	12843072	5 час 15 мин 50 с	1 час 21 мин 42 с	3,86
C2670	58705080	13 час 57 мин	3 час 43 мин 15 с	3,74

для схемы C2670 — 100 особей, для всех остальных ДУ — 500 особей.

Эксперименты показали, что практический смысл использования многомашиных систем имеют только вычисления со значительным объемом ДИ. В этом случае временные затраты на передачу данных по сети и синхронизацию становятся незначительными по сравнению с затратами на сами вычисления. В ходе экспериментов было установлено, что запуск на многомашиных системах ГА для поиска маски ДИ объема, не превышающего 10 мегабит, не дает преимущества во времени работы алгоритма по сравнению с запусками на одномошинной системе.

Четвертая глава диссертации посвящена разработке так называемых жадных алгоритмов поиска масок. Эти алгоритмы хотя и не гарантируют достижения абсолютного их минимума по объему, но требуют очень незначительных затрат памяти и обладают чрезвычайно высоким быстродействием.

Пункт 4.1 посвящен разработке жадного алгоритма для поиска единой маски. Предложенный алгоритм (назовем его алгоритмом 1) заключается в последовательном разбиении множества технических состояний на блоки в соответствии со значениями точек проверки, включаемых в маску-результат. Отбор точек проверки проводится в соответствии с оценкой значения среднего количества информации, необходимой для идентификации технического состояния при условии, что любая пара состояний из разных блоков разбиения заведомо различима.

Теорема 2. *Объем маски, полученной с помощью алгоритма 1, не превышает величину*

$$M \cdot \left(1 + \ln \frac{|S| \log_2 |S|}{2} \right),$$

где M — объем минимальной маски заданного СПР.

Теорема 3. *Пусть для СПР существует оптимальная маска $\tilde{h}$ объема r , а $\tilde{\rho}$ — величина диагностического разрешения при диагностировании с*

использованием $СПР_{\tilde{h}}$. Тогда, если h — маска объема r , найденная с помощью алгоритма 1, и ρ — диагностическое разрешение при диагностировании с помощью $СПР_h$, то справедливо следующее неравенство

$$\rho \geq \tilde{\rho} \left(1 - \frac{1}{e}\right).$$

Теорема 4. *Вычислительная сложность алгоритма 1 оценивается величиной $O(|S|^2 m |\tau|)$. Величина необходимого для функционирования алгоритма дополнительного объема памяти равна $O(|S|)$.*

Численные эксперименты показали высокую эффективность предложенного алгоритма для решения как задачи минимизации, так и задачи оптимизации ДИ. Так, в табл. 4 приводятся результаты применения алгоритма 1 для решения задачи минимизации ДИ, полученной с помощью тестовых последовательностей ИТЕС для некоторых дискретных устройств из каталога ISCAS'89 (их названия приведены в 1-ом столбце таблицы).

Таблица 4. Результаты поиска индивидуальной маски с помощью алгоритма 1

Схема	Объем ДИ, бит	Объем маски, бит	Объем сокращенной ДИ, бит	Доля сокращенной ДИ от полной ДИ	Время работы алгоритма, сек
S298	343896	61	10797	3,16%	1,464
S444	2580480	60	11460	0,45%	10,224
S526	1883172	38	5244	0,28%	5,784
S832	15554160	253	181907	1,17%	324,432
S953	105294	91	29666	28,26%	0,648
S1423	220500	93	27249	12,40%	1,368
S1488	30232800	384	521856	1,73%	1300,056

В пункте 4.2 предлагается алгоритм 2 для поиска совокупности индивидуальных масок для сокращения ДИ. В основе алгоритма 2 лежат идеи известного жадного алгоритма для нахождения оптимального покрытия множества, с помощью которого возможен поиск индивидуальной маски для каждого из технических состояний. Суть алгоритма 2 состоит в том, чтобы производить совместный поиск индивидуальных масок одновременно для всех технических состояний. Ускорение данного поиска достигается за счет однократного поиска общих фрагментов индивидуальных масок для различных технических состояний.

Теорема 5. *Суммарный объем совокупности индивидуальных масок, полученной с помощью алгоритма 2, не превышает величины*

$$M \cdot (1 + \ln(|S| - 1)),$$

где M — суммарный объем совокупности минимальных индивидуальных масок заданного СПР.

Теорема 6. *Временная сложность алгоритма 2 составляет $O(|S|^3 m |\tau|)$. Объем дополнительной памяти, необходимой для функционирования алгоритма 2 оценивается величиной $O(|S|^2)$.*

В табл. 5 приведены результаты работы алгоритма 2 на ДИ, составленной для ДУ из каталога ISCAS'89.

Таблица 5. Результаты поиска совокупности индивидуальных масок с помощью алгоритма 2

Схема	Объем ДИ, бит	Объем совокупности масок, бит	Объем максимальной маски, бит	Средний объем маски, бит	Объем словаря неисправностей, бит	Доля сокращенной ДИ от полной ДИ	Время работы алгоритма, сек
S298	343896	477	33	2.68	6732	1.96%	1.758
S444	2580480	527	40	2.74	9005	0.35%	12.402
S526	1883172	367	17	2.64	6286	0.33%	4.851
S832	15554160	2155	197	2.99	40230	0.26%	172.272
S1423	220500	960	57	3.27	12399	5.62%	0.438
S1488	30232800	4334	313	3.19	80473	0.27%	1017.504

Из сравнения объемов словарей неисправностей, полученных в результате сокращения ДИ с помощью единой маски и набора индивидуальных масок (табл. 4 и табл. 5, соответственно), можно сделать вывод, что сокращение информации с помощью индивидуальных масок в большинстве случаев происходит значительно эффективнее.

Пятая глава посвящена методу сокращения ДИ с использованием хеш-функций. На большом статистическом материале проиллюстрирована их высокая эффективность.

При таком подходе сокращение ДИ достигается за счет замены в СПР полной реакции ЦУ для каждого технического состояния на результат вычисления хеш-функции от этой реакции.

В диссертации исследуются пять хеш-функций, которые в качестве аргумента могут получать полную реакцию ЦУ, а в качестве результата выдают битовую последовательность длины r , где r — некоторое фиксированное положительное число. В числе этих хеш-функций две функции стандартного вида: полиномиальная и позиционная. Наряду с хеш-функциями стандартного вида рассматриваются функции, заданные сигнатурными анализаторами различной структуры.

Любая из этих функций задается единственным параметром, представляющим собой двоичную последовательность длины r . Кроме того, во

всех приведенных функциях за счет простоты выполняемых операций достигается высокая скорость вычислений, благодаря которой можно организовать перебор функций для различных значений определяющего параметра с целью задания наиболее подходящей хеш-функции.

Для оценки эффективности сокращения ДИ с помощью хеш-функций был проведен ряд экспериментов. В процессе выполнения экспериментов подбиралась каждая из разновидностей хеш-функции для каждого варианта ДИ. Для каждого из значений r , начиная с $\lceil \log_2 |S| \rceil$, делалось несколько попыток подбора соответствующего параметра. При обнаружении хеш-функции с отсутствием коллизий на множестве аргументов, определенных СПР, процесс поиска прекращался.

Эксперименты показали, что объем сокращенной с помощью хеш-функций ДИ в большинстве случаев составляет менее процента от исходного объема. С точки зрения числа подходов к подбору хеш-функции наиболее привлекательной является функция, порожденная одноходовым сигнатурным анализатором. Средние значения результатов такого подбора для некоторых ЦУ из каталога ISCAS'89 приведены в табл. 6.

Таблица 6. Результаты сокращения ДИ с помощью одноходового сигнатурного анализатора

ДУ	Объем ДИ, бит	r	Объем сокращенной ДИ, бит	Доля сокращенной ДИ от полной ДИ	Время подбора h , мс
S298	343896	13,3	2367,4	0,69%	231,24
S344	336677	14,2	3422,2	1,02%	265,98
S444	2580480	14,1	2707,2	0,10%	1944,69
S526	1883172	12,8	1779,2	0,09%	1440,39
S832	15554160	17,6	12672,0	0,08%	17568,15
S1423	220500	14,9	4380,6	1,99%	164,58
S1488	30232800	19,1	25976,0	0,09%	40219,38

Эксперименты также показали, что поиск позиционной хеш-функции происходит медленнее, т. е. за большее число итераций перебора, чем поиск любой другой рассматриваемой хеш-функции.

В **заключении** работы приведены основные результаты, полученные в диссертации, состоящие в следующем:

1. Проведен анализ существующих средств и методов сокращения диагностической информации, выявлены их достоинства и недостатки. На основе анализа этих методов сформулированы возможные направления их совершенствования.
2. Разработаны алгоритмы для поиска единых масок и совокупностей индивидуальных масок, базирующиеся на использовании эволюци-

онных методов. Достоинством данных алгоритмов является прежде всего приемлемое время получения близких к оптимальным решений для реальных ДУ. Отметим также, что несмотря на вероятностный характер алгоритмов, с их помощью можно получить и точное оптимальное решение.

3. Разработан жадный алгоритм для поиска единой маски. Данный алгоритм применим как для решения задачи минимизации ДИ, так и для решения задачи оптимизации ДИ.
4. Разработан жадный алгоритм поиска совокупности индивидуальных масок для решения задачи минимизации ДИ.
5. Получены теоретические оценки вычислительной (временной и емкостной) сложности предложенных в диссертации алгоритмов нахождения масок. Из этих оценок следует, что поиск масок с помощью разработанных алгоритмов производится достаточно эффективно. Этот вывод подтвержден статистическими данными проведенных численных экспериментов.
6. Предложен новый подход к сокращению ДИ, базирующийся на применении хеш-функций и обеспечивающий высокую степень сжатия ДИ без потери разрешающей способности диагностирования. Результаты проведенных экспериментов подтверждают эффективность данного метода по сравнению с традиционными.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

(первые три опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК РФ)

- [1] *Миронов, С. В.* Генетические алгоритмы для сокращения диагностической информации / С. В. Миронов, Д. В. Сперанский // *Автоматика и телемеханика*. — 2008. — № 7. — С. 146–156.
- [2] *Миронов, С. В.* Об одном алгоритме для поиска маски диагностической информации / С. В. Миронов // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика*. — 2008. — Т. 8, № 2. — С. 77–84.
- [3] *Гольдштейн, В. Б.* Хеш-функции для сокращения диагностической информации / В. Б. Гольдштейн, С. В. Миронов // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика*. — 2007. — Т. 7, № 2. — С. 76–81.

- [4] *Миронов, С. В.* Сокращение диагностической информации при тестировании дискретных устройств / С. В. Миронов, Д. В. Сперанский // Proceedings of 2007 Computer-Aided Design of Discrete Devices (CAD DD'07). — Минск: 2007. — С. 198–206.
- [5] *Speranskiy, D. V.* Genetic algorithms for fault dictionary size reduction / D. V. Speranskiy, S. V. Mironov // Proceedings of IEEE East-West Design & Test International Symposium (EWDTS'07). — Erevan: 2007. — Pp. 140–145.
- [6] *Миронов, С. В.* Деревья решений в задачах сокращения диагностической информации / С. В. Миронов, Д. В. Сперанский // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. — 2007. — № 7. — С. 147–152.
- [7] *Миронов, С. В.* Генетические алгоритмы в задачах сокращения диагностической информации / С. В. Миронов, Д. В. Сперанский // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. — 2006. — № 4. — С. 45–48.
- [8] *Миронов, С. В.* Генетические алгоритмы для сокращения диагностической информации / С. В. Миронов, Д. В. Сперанский // Компьютерные науки и информационные технологии. Тезисы докладов Международной научной конференции, посвященной памяти профессора А. М. Богомолова. — Саратов: 2007. — С. 82–83.
- [9] *Mironov, S. V.* One approach to fault dictionary size reduction / S. V. Mironov, D. V. Speranskiy // Proceedings of IEEE East-West Design & Test International Symposium (EWDTS'07). — Lviv: 2008. — Pp. 295–300.

Подписано в печать 19.11.08.

Формат 60× 84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Компьютер Модерн.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ

Типография Издательства Саратовского университета.
410012, Саратов, Астраханская, 83.