

## ПРОБЛЕМЫ ЗОНДОВОГО ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ И ПУТИ ИХ РАЗРЕШЕНИЯ

Зинченко Ю.Е., Козинец А.М., Жилин К. Н.

Кафедра ЭВМ ДонГТУ  
zinchenko@cs.dgtu.donetsk.ua

### Abstract

*Zinchenko.J.J., Kozinec A.M., Shilin K.N. Problems of fault diagnosis based on technique of guided probe and path of their solution.* The functional and structural systems of fault diagnosis based on technique of guided probe are considered and is justified a choice for the benefit of last. The basic problems of structural systems are analyzed and the paths of their solution are offered.

### Введение

Анализ систем зондовой диагностики (ЗД) [1-7] показывает, что несмотря на высокие полученные результаты (разработаны достаточно мощные технические средства и спроектировано развитое программное обеспечение) для этих систем остается неразрешенным ряд классических задач проблемного характера, среди которых в первую очередь следует выделить проблемы минимизации перестановок зонда, локализации неисправности с точностью до съемной компоненты и проблему минимизации внешней памяти системы ЗД. Несмотря на то что эти задачи стали уже классическими ученые-диагносты попрежнему ведут исследования в этом направлении. Анализу указанных проблем а также поиску путей их разрешения и посвящается настоящая работа.

### 1. Функциональные и структурные системы зондовой диагностики

Как известно, процесс ЗД предполагает такую организацию, когда на внешние входы объекта диагностики (ОД) подаются *тестовые воздействия*, с внешних выходов снимаются *тестовые реакции* (ТР). Заключение об исправности ОД делается путем сравнения ТР с эталонными значениями, а поиск неисправности ОД ведется путем зондирования его внутренних контрольных точек (КТ) по алгоритму "*ведомого зонда*", подразумевающему прослеживание топологических путей объекта с "неверной" ТР в направлении от внешних выходов ко входам до места возникновения неисправности.

Для реализации такого процесса вычислительный комплекс системы ЗД должен содержать устройство внешнего тестирования - пост контроля, устройство зондирования и инструментальную ЭВМ. Пост контроля выполняет функции генерации тестов и анализа внешних ТР, с помощью устройства зондирования производится зондирование внутренних КТ объекта, на инструментальную ЭВМ возлагаются "интеллектуальные" функции: реализация алгоритма ЗД, диалог с диагностом, сопряжение с постом контроля и устройством зондирования, управление ресурсами системы и т. д..

Одним из критериев классификации систем ЗД является способ представления эталонных ТР объекта ЗД. Существующие способы можно разделить на две группы. *Первая группа* основывается на вычислении, *вторая* - на хранении ТР в памяти ЭВМ. Для систем первого типа, помимо топологической схемы, необходимо задавать функцию, реализуемую ОД и его компонентами; для систем с хранением ТР можно ограничиться заданием топологической схемы ОД. Поэтому системы первого типа будем называть функциональными, а системы второго типа - структурными. Являясь на первый взгляд частным, рассмотренный критерий классификации по существу определяет две диаметрально противоположные системы. Их анализ позволяет сделать следующие выводы.

**Функциональные системы** не требуют внешней памяти для хранения эталонов, однако их вычисление практически невозможно без системы логического моделирования (СЛМ), использование которой сопряжено со следующими недостатками. *Во-первых*, расширение номенклатуры ИМС требует постоянного пополнения библиотеки СЛМ, что сопряжено с высокой трудоемкостью, в особенности для БИС. Кроме того не всегда известны принципиальные схемы БИС, поэтому модели таких элементов не всегда адекватны. *Во-вторых*, характерная для настоящего времени тенденция роста степени интеграции ИМС, и связанное с этим усложнение вычислительных устройств (ВУ), на которых они выполняются, способствуют увеличению времени вычисления реакций, что ставит под сомнение возможность реализации режима "реального времени", в котором должен выполняться процесс зондирования. *В-третьих*, усугубляются общеизвестные сложности моделирования динамики ВУ, так как современные устройства имеют тенденцию повышения быстродействия.

**Структурные системы** не требуют вычисления эталонных ТР, так как после их съема с физического эталонного ОД они постоянно хранятся в памяти ВЗУ. В связи с этим отпадает необходимость в наличии СЛМ. Поэтому структурные системы, по сравнению с функциональными, требуют небольшого объема ОЗУ, характеризуются существенно меньшим временем реакции, а также более меньшей трудоемкостью и сложностью организации программного обеспечения системы. Однако существенным недостатком структурных систем является большой объем внешней памяти для хранения эталонных ТР, что также усугубляется ростом степени интеграции БИС и сложностью ОД.

Таким образом, как функциональные так и структурные системы ЗД имеют существенные недостатки, затрудняющие их реализацию на современной технической базе. Однако, более детальный анализ тенденций развития вычислительной техники позволяет сделать выбор все же в пользу структурных систем. Действительно, вряд ли следует ожидать, что быстродействие СЛМ в ближайшее время опередит рост степени интеграции БИС. Длина тестов микропроцессорных устройств достигает нескольких Мбайт а время моделирования устройства на таком тесте составит несколько минут, что является абсолютно неприемлемым. В то же время высокими темпами совершенствуются ВЗУ в сторону увеличения емкости, а это смягчает проблему внешней памяти. Поэтому приведенные доводы позволяют сделать выбор в пользу структурных систем ЗД. Так как совершенствование ВЗУ не решает полностью проблему внешней памяти, то для ее окончательного разрешения необходимо предусмотреть дополнительные мероприятия.

## 2. Минимизация перестановок зонда

Классический алгоритм "ведомого зонда" (назовем его алгоритмом SCAN) состоит в последовательном зондировании (сканировании) одной из цепей ОД, по которой проявляется неисправность, в направлении от выхода объекта ко входам. Достоинством алгоритма является его простота, высокое быстродействие; среди недостатков можно выделить следующие. *Во-первых*, алгоритм не адаптирован для реальных ВУ, содержащих не только "правильные" цепи, но и двунаправленные, высокоимпедансные, аналоговые цепи, а также дискретные компоненты (резисторы, конденсаторы, диоды и т. д.). *Во-вторых*, алгоритм характеризуется большим числом перестановок зонда, что приводит к высокой трудоемкости поиска неисправностей. Отсюда вытекает потребность, *во-первых*, в адаптации классического алгоритма к реальным ВУ, и *во-вторых*, в минимизации перестановок зонда.

Минимизация перестановок зонда стала уже традиционной задачей; диагностика неоднократно предпринимались попытки ее разрешения [2,7-12]. Детальный анализ предложенных решений этой задачи позволяет выявить следующие их недостатки. *Во-первых*, не предложены эффективные способы минимизации для ВУ с глобальными обратными связями, т. е. для сильнопоследовательностных ВУ. *Во-вторых*, опять же остается открытой адаптация алгоритмов поиска неисправностей

(АПН) к реальным ВУ. В-третьих, реализация предложенных алгоритмов приводит к большим временным потерям из-за их высокой сложности.

Выявленные недостатки попыток минимизации перестановок зонда по нашему мнению обусловлены не только тем, что не найден "наилучший" алгоритм. Вряд ли следует ожидать, что будет найден алгоритм для реальных ВУ, обладающий минимальным числом перестановок зонда и одновременно являющийся настолько простым, что его реализация станет возможной в режиме "реального времени". Не оставляя попытку поиска оптимального АПН, этот подход все же целесообразнее разрабатывать таким образом, чтобы трудоемкая задача построения АПН решалась как синтез гипотез всевозможных неисправных состояний объекта ЗД и алгоритмов их идентификации до начала этапа собственно диагностики ВУ. Такой подход позволил бы распараллелить две трудоемкие задачи (алгоритм поиска и собственно поиск неисправности), что в свою очередь упростит построение программного обеспечения системы ЗД, сделает возможным зондирование в режиме "реального времени", повысит гибкость и адаптируемость системы к различным стратегиям поиска неисправностей. Реализация описанной идеи возможна на базе графа поиска неисправностей, предварительно построенного для ОД [7,11,12].

В [11] минимизация перестановок зонда обеспечивается решением следующих задач:

статическая оптимизация - оптимизация топологической схемы - в сочетании с алгоритмом SCAN позволяет для среднестатистической схемы снизить число перестановок зонда на 20-30%;

динамическая оптимизация - приведение ОД к модели "древовидной схемы" и минимизация перестановок зонда по древовидной схеме.

### 3. Локализация неисправности и проблема внешней памяти

Другой, не менее важной, чем минимизация перестановок зонда, является проблема локализации неисправности объекта ЗД.

Целью ЗД является обнаружение источника неисправности с точностью до отдельной съемной компоненты. Трудность разрешения этой проблемы обусловлена наличием обратных связей в структуре ОД. Стремительный прогресс технологии элементной базы и завоевавшая приоритет "шинная архитектура" ВУ значительно усугубляет эту проблему, так как, кроме наличия "правильных" цепей с обратными связями, приходится также учитывать и широкий спектр технологических особенностей. В результате предложенные АПН позволяют локализовывать неисправность с точностью до группы компонент, обычно образующих цепь элементов с обратной связью или являющихся однопотенциальными. Детальный анализ процесса ЗД показывает, что разрешению проблем локализации неисправностей и внешней памяти могут быть обеспечены [11]:

- сочетанием способов представления ТР;
- фиксацией моментов появления первой ошибки;
- преобразованием ОД;
- сочетанием способов синхронизации съема ТР;
- "селективным моделированием" ОД;
- частичным снижением диагностоспособности системы.

### 4. Анализ тестовых реакций

Как известно, ТР можно представить полноразрядной последовательностью либо ее сжатым эквивалентом - *сигнатурой* [6]. Так как длина полноразрядной реакции обыч-

но очень большая ( может достигать нескольких Мбайт), то с целью экономии памяти выгоднее сигнатура, длина которой составляет несколько (обычно два) байт.

Действительно, объем памяти ВЗУ ( $V_{\text{треб}}$ ) системы ЗД, требуемый для хранения ТР, можно рассчитать по формуле:

$$V_{\text{треб}} \sim ( N_s \cdot V_s + N_p \cdot V_p ),$$

где  $V_s$  ( $V_p$ ) - объем памяти, необходимый для хранения сигнатуры (полноразрядной) ТР ;

$N_s$  ( $N_p$ )- число КТ, ТР с которых снимается по методу компактного (логического) анализа.

Так как в подавляющем большинстве случаев  $V_p \gg V_s$ , то  $V_{\text{треб}}$  определяется фактически числом КТ ОД с полноразрядной ТР, т. е.

$$V_{\text{треб}} \sim N_p.$$

Однако сигнатурное представление ТР объекта ЗД снижает диагностическую способность системы, так как в этом случае не локализуются неисправности в цепях компонент с обратными связями.

В самом деле, если неисправная компонента принадлежит контуру, по которому распространяется ошибка, вызванная этой неисправностью, то возникает трудность ее идентификации, так как в принципе любая другая компонента контура может быть причиной ошибки. Если при этом эталонная реакция элементов контура будет представлена сигнатурами, то идентифицировать неисправный элемент не представляется возможным и неисправными будут объявлены все элементы контура. С другой стороны, представление эталонных реакций полноразрядными последовательностями позволяет решить эту задачу положительно за счет *фиксации моментов появления первой ошибки*. Тогда тот элемент, который первым выставляет на своем выходе ошибочный бит ТР и является источником неисправности. Идентификация в этом случае затруднительна лишь в одном случае, когда моменты появления первой ошибки совпадают для всех элементов кольца - в этом случае они так же, как и в случае сигнатурного представления ТР объявляются источниками неисправности. Такое довольно редкое стечение обстоятельств, как правило, характерно для колец с комбинационными элементами.

Поэтому ТР целесообразно представлять путем *сочетания полноразрядного и компактного способов*, задавая в цепях ОД с обратными связями полноразрядные ТР, а в остальных КТ объекта - сигнатуры. Такую задачу без ущерба для диагностической способности системы можно представить в следующей оптимизационной постановке:

$$\begin{aligned} N_p &\rightarrow \min ; \\ D &= 100 \% ; \\ R &= 0 , \end{aligned}$$

где  $D$  - диагностическая способность ОД, выраженная в процентах;

$R$  - число разрывов обратных связей, отражающее степень преобразования ОД.

Отказ от функциональных систем ЗД в принципе не исключает возможность вычисления ТР там, где это можно сделать наиболее просто. Так путем инвертирования входной реакции инвертора можно вычислить реакцию его выхода. Ясно, что в этом случае вовсе не обязательно наличие СЛМ. Этот подход, который мы предлагаем называть *селективным моделированием*, можно распространить на отдельные фрагменты схемы ОД, состоящие из интегральных схем малой степени интеграции. Во избежание итерационного характера вычислений эти фрагменты не должны содержать контуров, иначе явно или неявно возникнет необходимость использования СЛМ. Кроме того из-за временных ограничений фрагменты должны быть простыми.

### 5. Зондопригодное проектирование

Следующий источник повышения диагнозоспособности и сокращения внешней памяти может быть получен за счет преобразования ОД путем *разрыва цепей с обратными связями*. Разрыв может быть физическим, когда в разрываемую цепь ставится механический переключатель, либо логическим с применением электронного вентиля.

Ясно, что число разрываемых связей ОД из-за вносимых дополнительных аппаратурных затрат должно быть ограниченным ( $R_{доп}$ ). Поэтому данную задачу можно представить в следующей оптимизационной постановке:

$$\begin{aligned} N_p' &\rightarrow \min ; \\ D &= 100 \% ; \\ R &\square R_{доп} , \end{aligned}$$

Такое преобразование ОД, осуществляемое в процессе его диагностирования, позволяет представлять ТР КТ, принадлежащие контурам исходной схемы ОД, уже не полноразрядной ТР, а сигнатурой. Этот способ предусматривает необходимость специального (зондопригодного) проектирования ОД.

Побочным эффектом зондопригодного проектирования является внесение избыточности в структуру ОД. Кроме того представляется затруднительным преобразование двунаправленных цепей. Однако для "правильных" цепей его применение может привести к существенному сокращению памяти ВЗУ.

*Другой подход* основывается на следующем. В качестве источника синхронизации ТР, снимаемой с некоторой КТ ОД, может выступать синхросерия некоторого генератора импульсов или ТР другой КТ ОД. Так, например, в микропроцессорной системе ТР на входе БИС целесообразно стробировать сигналом "Выборка кристалла" этой микросхемы, так как это снизит избыточность информации зондируемого входа. Для этого устройство зондирования должно содержать средства для коммутации источников синхронизации от внутренних КТ объекта. Желательно также наличие программы, которая по описанию принципиальной схемы объекта, определяла бы для каждой КТ оптимальный источник синхронизации, что избавило бы диагноста от рутинной подготовительной работы на этапе создания информационного обеспечения объекта.

### 6. Снижение диагнозоспособности

Рассмотренные идеи позволяют снизить емкость требуемой внешней памяти системы ЗД, не ухудшая ее диагнозоспособность. Однако этого может оказаться недостаточным. В этом случае в качестве следующего источника сокращения внешней памяти системы может послужить подход на базе частичного снижения диагнозоспособности.

В основу предлагаемого способа может быть положена *идея принудительного назначения сигнатурного представления ТР* даже тем КТ, которые расположены на контурах топологической схемы ОД. С целью минимизации отрицательного эффекта количество таких точек -  $N_p''$  - должно быть минимальным (не превышать  $N_{рдоп}$ ), а их расположение должно выбираться так, чтобы обеспечивалась максимально возможная диагнозоспособность ОД. Выражаясь формально, данную задачу следует представить в следующей оптимизационной постановке:

$$\begin{aligned} D &\rightarrow \max ; \\ N_p'' &\square N_{рдоп} ; \\ R &= 0 , \end{aligned}$$

где  $N_{рдоп}$  - максимально возможное число КТ ОД с полной ТР, которое удовлетворяет систему ЗД по объему памяти ВЗУ, необходимой для хранения эталонных ТР.

## Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

1. В ряд основных проблем ЗД следует поставить проблемы минимизации перестановок зонда, локализации неисправности с точностью до съемной компоненты и проблему минимизации внешней памяти.
2. На данном этапе развития вычислительной техники структурные системы ЗД предпочтительнее функциональных.
3. Остаются актуальными задачи адаптации алгоритмов ЗД к реальным ВУ и минимизации перестановок зонда. Наиболее эффективно по комплексу параметров эти задачи могут быть решены на базе графа поиска неисправностей.
4. Разрешение проблем локализации неисправностей и внешней памяти могут быть обеспечены комплексом следующих мероприятий: сочетанием способов представления ТР; фиксацией моментов появления первой ошибки; преобразованием ОД; сочетанием способов синхронизации съема ТР; селективным моделированием ОД; частичным снижением диагностоспособности системы.

## Литература

1. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики: (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства). - М.: Энергия, 1981.- 320 с.
2. Топенко В.Г. Алгоритмы технического диагностирования дискретных устройств.- М.: Радио и связь, 1985. - 240 с.
3. Мальшенко Ю.В., Чипулис В.П., Шаршунов С.Г. Автоматизация диагностирования электронных устройств.- М.: Энергоатомиздат, 1986. - 216 с.
4. Львович Г.А., Самощенко А.В., Хавкин В.Е. Диагностирование микропроцессорных систем // Обзоры по электронной технике. Сер. Микроэлектроника, 1987, Вып.7. - 83 с.
5. Abramovici, Miron. Digital System Testing & Testable Design.- IEEE, 1990.- 570p..
6. Тупкало В.П. Основы теории сигнатурного анализа цифровых систем. МО Украины, 1994.
7. Техническая диагностика элементов и узлов персональных компьютеров / В.И. Хаканов.- К.: ИСИО, 1997.- 308 с..
8. Молов В.К., Тарасенко В.П. Структурно-ориентированный метод поиска неисправностей в цифровых устройствах // Автоматика и вычислительная техника. - 1989. - N2. - С. 72-78.
9. Сперанский Д.В., Черевко Н.В. О сокращении числа зондовых проб при диагностировании цифровых устройств. // Электронное моделирование. -1992. - N3. - с.56-62.
10. Рустинев В.А. Структурные методы построения квазиоптимальных алгоритмов поиска неисправностей в модулях РЭА / Повышение эффективности программных и аппаратных средств контроля и диагностирования в ГПС приборостроения: Тез. докл. н/т. техн. конф., Севастополь, 1988.- Л.: Судостроение, 1988.- 43 с..
11. Зинченко Ю.Е., Хатейт Ю. Стратегия поиска неисправностей системы зондовой диагностики / Теоретическая и прикладная информатика. Н/т конф.. - Донецк, 1993.
12. Зинченко Ю.Е., Стельмах С.И., Чернявский Н.М. Оптимизация зондового диагностирования вычислительных устройств / Доклады н/т конф. "Творческое наследие В.И. Вернадского и современность". Секция 4 "Актуальные проблемы вычислительной техники, информатики и энергетики".- Донецк ДонГТУ, 1995.- С. 16-18.
13. Зинченко Ю.Е., Семененко В.П. Граф поиска неисправностей объекта зондовой диагностики / Доклады н/т конф. "Творческое наследие В.И. Вернадского и современность". Секция 4 ".- Донецк ДонГТУ, 1995.- С. 19-21.