

**Е.Л. Кон, В.И. Фрейман**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет

## **ПОДХОДЫ К ТЕСТОВОМУ ДИАГНОСТИРОВАНИЮ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ**

*Рассмотрены проблемы диагностирования цифровых устройств в составе элементов современных инфокоммуникационных и информационно-управляющих систем.*

### **Актуальность проблемы**

Процесс диагностирования технического состояния элементов и узлов аппаратуры, в частности *тестового диагностирования*, является одной из наиболее сложных и трудоемких операций, сопровождающих изделие на всех этапах жизненного цикла цифровых компонентов инфокоммуникационных (ИКС) и информационно-управляющих (ИУС) систем. Совершенствование технологической базы позволило использовать при создании современных цифровых устройств и систем базис СБИС (программируемые логические интегральные схемы – ПЛИС (PLD, FPGA), системы на кристалле (SoC), цифровые сигнальные процессоры – ЦСП (DSP)), содержащие число вентилях порядка  $10^5 \dots 10^7$ . Это резко усложнило решение задач технического диагностирования из-за увеличения размерности, функциональности и вида дефектов объектов диагностирования (ОД). Поэтому поиск решения множества частных задач технического диагностирования цифровых компонентов ИКС и ИУС, учитывающих специфику современного технологического базиса, размерность, быстродействие и другие факторы, по-прежнему остается актуальной задачей. Отличие подходов к техническому диагностированию указанного класса устройств на разных этапах жизненного цикла (разработки, изготовления и эксплуатации) требует отдельного рассмотрения и исследования.

В настоящей статье будут рассмотрены некоторые подходы к тестовому диагностированию цифровых устройств, выполненных в современном аппаратно-программном базисе (СБИС) с использованием наиболее распространенной технологии изготовления – КМОП, на этапах разработки, изготовления и эксплуатации. Для указанного объекта исследования по-прежнему актуальны задачи разработки адекватных диагностических моделей, методов синтеза полных тестов, алгоритмов реализации процедуры тестового диагностирования, методологии построения автоматизированных систем тестового диагностирования и т.п. Анализ ряда существующих результатов и разработке подходов к решению некоторых из указанных частных задач и посвящена данная работа.

### **1. Задачи тестового диагностирования**

Задачи тестового диагностирования должны решаться на всех этапах жизненного цикла аппаратуры, проектирования. В связи с этим целесообразно применить иерархическое представление информационной системы, решающей задачи диагностирования. Например, для аппаратуры информационно-управляющих или инфокоммуникационных систем на практике наиболее часто используется иерархия диагностирования на уровне: компонентов (узлов) платы, платы в составе блока, блока в составе изделия, изделия в составе системы (рис. 1). Охарактеризуем подходы к решению задач технического диагностирования применительно к указанным уровням.

При решении задач тестового диагностирования на этапе разработки цифровых компонентов ИКС и ИУС с учетом их контролепригодности важно выбрать адекватную диагностическую модель (ДМ). ДМ в основном определяется особенностями предполагаемой технологии изготовления компонентов, видами и характеристиками технологических дефектов и т.д. Также на данном этапе разрабатываются методы и алгоритмы повышения контролепригодности, которые позволяют повысить эффективность диагностирования. Это возможно за счет снижения размерности объекта диагностирования, что позволяет снизить размерность задачи построения диагностических тестов, дешифрации результатов эксперимента, расширения номенклатуры учитываемых дефектов и их проявлений, повышения процента покрытия дефектов тестами, уменьшения времени тестирования и т.п. Для решения указанных задач технической диагностики, как правило, используется *инструментальная*

среда на основе мощных компьютеров высокой производительности, многозадачного системного программного обеспечения и пополняемой библиотеки алгоритмов и моделей.

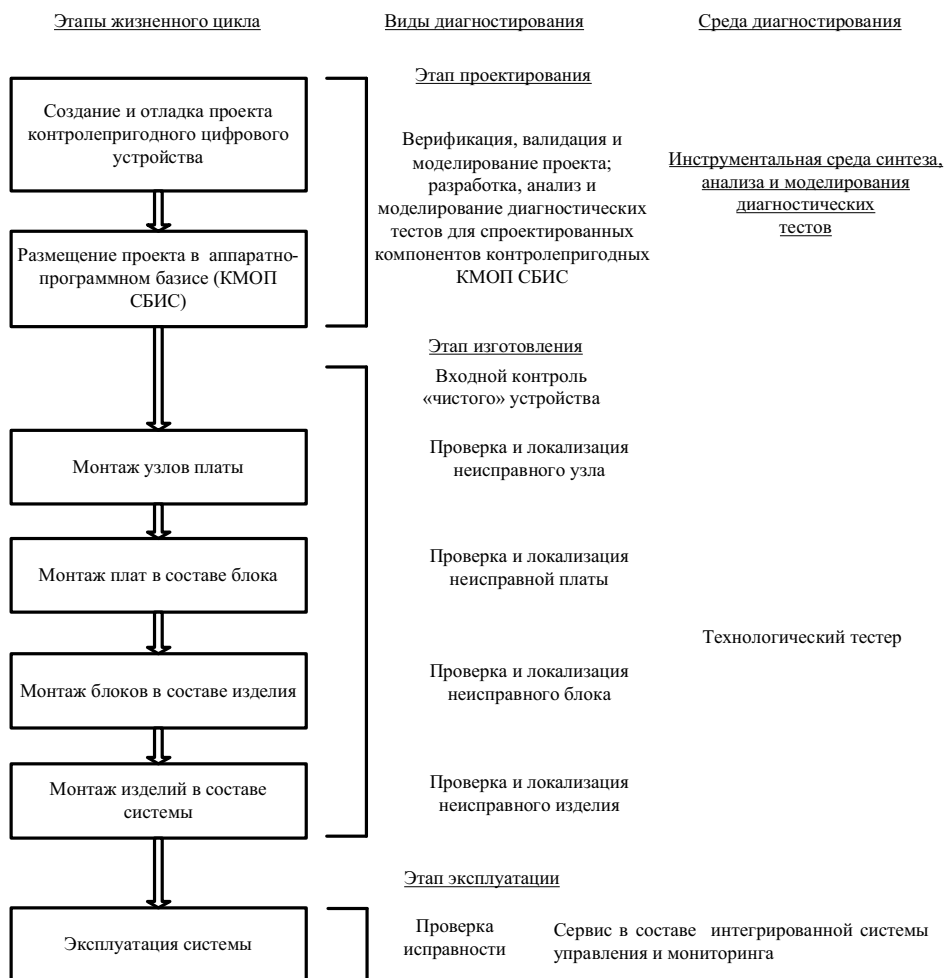


Рис. 1. Место тестового диагностирования на этапах жизненного цикла аппаратуры ИКС и ИУС

Основные задачи инструментальной среды могут быть сформулированы следующим образом:

- загрузка и анализ диагностической модели проверяемого устройства;

- вычисление диагностических тестовых последовательностей для выбранной модели дефектов с учетом контролепригодности объекта диагностирования;

– анализ полноты построенного теста с помощью различных видов моделирования и декомпозиции объекта диагностирования.

На выходе этапа разработки цифрового устройства должны быть получены: совокупность тестовых последовательностей для выбранной диагностической модели, таблица анализа результатов проверки либо поиска неисправностей, информация по размещению устройства по элементарным модулям для возможности реконфигурации, параметры настройки механизмов обеспечения контролепригодности (декомпозиция устройства на комбинационную часть и память, задействование средств повышения контролепригодности (например, граничного сканирования) и др.).

На этапе изготовления узлов, модулей, сборки и отладки изделия применяется автоматизированная система тестового диагностирования (АСТД), реализуемая в виде *технологического тестера*, в задачи которого входит:

- организация взаимодействия с объектом диагностирования;
- реализация процедуры тестового и системного диагностирования;
- анализ (дешифрация) результатов тестирования.

Рассмотрим более подробно процедуру тестового диагностирования на разных этапах разработки, изготовления и эксплуатации объекта диагноза.

В процессе входного контроля «чистого», т.е. незапрограммированного, устройства имеется возможность создания специальных конфигураций, упрощающих сложность синтеза тестов (например, создание древовидных структур из элементов СБИС). Тестирование в указанном режиме позволит проверить техническое состояние всех элементов КМОП СБИС. Одной из основных задач инструментальной среды на данном этапе является построение диагностических тестов (проверки либо локализации кратных дефектов с заданной глубиной поиска) размещаемого проекта цифрового устройства. При этом для уменьшения размерности указанной задачи необходимо использовать декомпозицию, реконфигурацию и контролепригодность объекта диагностирования (ОД).

На этапах изготовления после размещения проекта в базисном компоненте (DSP, SoC, FPGA и т.п.) проводится функциональное и тестовое диагностирование.

Функциональное диагностирование ОД (различного уровня иерархии) решает задачу функционального контроля и реализуется, как правило, на испытательных стендах с использованием физических, а не виртуальных, модулей, плат, блоков, изделий или систем. Полнота функционального диагностирования определяется полнотой функциональных тестов и адекватностью моделей физических (технологических, производственных, монтажных и др.) дефектов. При этом правильная реакция теста позволяет утверждать об отсутствии дефектов из заданного списка, т.е. проверяемая функция исправна только в пределах построенного и реализованного теста для определенного вида функциональных дефектов.

Тестовое диагностирование при монтаже плат, блоков и изделий позволяет оценить правильность размещения, проверить исправность и локализовать неисправный узел. Неисправности на данном этапе могут возникнуть при программировании вследствие воздействия помех, некачественной разработки самих схем и т.п. По статистике до 20 % узлов имеют те или иные дефекты после выполнения монтажа платы, из них более половины – короткие замыкания межсоединений. Указанный фактор требует доработки традиционной константной модели дефектов и перехода к более адекватным моделям, в частности, к моделям расширенного класса дефектов, учитывающих сочетания константных дефектов, коротких замыканий и нетрадиционных дефектов.

На этапе эксплуатации или при регламентных работах для проверки каждого функционального узла (модуля, платы, блока, изделия) применяется АСТД, интегрированная с *системой управления и мониторинга* (СУиМ). Такая система наряду с функциональным контролем рабочих характеристик и параметров позволяет производить выборочное или полное тестовое диагностирование цифровых устройств в составе блока, изделия или системы. Набор аппаратных средств в данном случае очень широк: от специализированных технологических тестеров и измерительных приборов до встроенных в аппаратуру средств встроенного контроля (СВК).

Рассматриваемые в рамках данной работы методы и алгоритмы тестового диагностирования относятся к этапу разработки и размещения проекта в базе, а также к этапам монтажа и эксплуатации (ремонт и восстановление) узлов типовых элементов замены (ТЭЗы).

Современные автоматизированные системы технического диагностирования элементов и устройств аппаратуры информационно-управляющих систем сами по себе являются сложными многофункциональными иерархическими системами. Для проектирования и эффективного внедрения таких систем необходимо учитывать множество взаимосвязанных факторов, таких как уровневую структуру, диагностическую модель элементов и взаимосвязей между ними, методы синтеза тестов, алгоритмы реализации процедуры диагностирования, анализ результатов проверки и принятие решения (диагноза), особенности различных видов обеспечения и т.д. Для учета большого количества факторов требуется разработка *методологии проектирования и применения АСТД*.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, можно выделить несколько укрупненных блоков (модулей) задач тестового диагностирования цифровых устройств и систем:

1. Разработка методов и моделей тестового диагностирования, включающих алгоритмы синтеза диагностических тестов, дешифрацию результатов эксперимента, модели дефектов, моделирование. По результатам решения задач данного блока разрабатывается математическое, информационное и алгоритмическое обеспечения проектируемой АСТД.

2. Анализ методов тестопригодного и контролепригодного проектирования объектов диагностирования. Они позволят применить результаты решения задач 1-го модуля для диагностирования компонентов, реализованных в современном контролепригодном аппаратно-программном базисе, и снизить размерность задачи синтеза полных диагностических тестов.

3. Разработка методов и моделей сетевого (системного) диагностирования, реализуемых как дополнительные сервисы в составе интегрированной системы управления и мониторинга (ИСУМ) аппаратуры ИКС и ИУС.

4. Разработка методов (подходов) проектирования автоматизированных систем тестового диагностирования (технологических тестеров), включая аппаратное, программное, информационное и алгоритмическое обеспечение с требуемыми характеристиками.

В настоящей статье приводятся полученные авторами результаты некоторых задач в составе указанного выше первого укрупненного

модуля, а именно разработка и анализ математического аппарата СОБД, диагностических моделей РКД, метода синтеза полных динамических (импульсных) тестов цифровых КМОП СБИС компонентов ИКС и ИУС и обсуждение подходов к реализации процедуры тестового диагностирования.

## **2. Структура автоматизированной системы тестового диагностирования**

Для проектирования АСТД необходимо реализовать различные виды ее обеспечения. Выделим основные виды *обеспечения* обобщенной АСТД и соответствующего инструментария: информационное (ИО), математическое (МО), алгоритмическое (АО), программное (ПО) и аппаратное (АО). Кратко охарактеризуем каждый из названных видов обеспечения.

*Информационное обеспечение* АСТД включает в себя способы представления, накопления, хранения, преобразования, передачи и дешифрации диагностической информации. Одной из основных составляющих ИО, наряду с библиотекой полных диагностических тестов, является набор диагностических моделей (ДМ) базисных элементов современной аппаратуры.

Адекватная ДМ решающим образом влияет на структуру и длину тестовых последовательностей, номенклатуру обнаруживаемых производственных дефектов, полноту и качество теста [2, 3].

Диагностическая модель *расширенного класса дефектов* (РКД) была предложена и исследована учеными А. Abraham, J. Goliay, E. Randal, A. Bryant и другими. В Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ) на протяжении многих лет группой преподавателей и сотрудников под руководством профессора Е.Л. Кона проводились исследования по разработке алгоритмов синтеза вариационных (динамических) тестов для константных дефектов и дефектов из РКД. По результатам работ имеются многочисленные публикации [4–9]. Как отмечалось выше, диагностическая модель РКД цифровых устройств, реализованных в современном аппаратно-программном базисе (КМОП СБИС), включающая «классические» или «традиционные» («константные дефекты») и «нетрадиционные» («триггерный эффект» и «соперничество сигналов разной силы») проявления, а также дефекты типа «коротких замыканий» и «обратных связей», является предметом анализа данной статьи. Следует отметить,

что при производстве устройств в КМОП-технологии все больше становится дефектов типа «перемычка» («короткие замыкания»), которые могут изменить топологию схемы и в ряде случаев преобразуют комбинационную схему в последовательностную («обратные связи»). Нам представляется, что для указанных дефектов интересно исследовать *логику-параметрическую* модель дефектов, учитывающую логические дефекты и короткие замыкания, вызывающие изменения временных параметров устройств.

*Математическое обеспечение инструментальной среды АСТД* представляет собой математический аппарат, применяемый для вычисления тестовых последовательностей, моделирования дефектов, проверки полноты теста для заданного перечня неисправностей РКД, анализа результатов тестирования и т.д. Для построения тестов проверки исправности цифровых устройств, реализованных в современном аппаратно-программном базисе (КМОП СБИС), эффективным показал себя математический аппарат *булевых дифференциалов*, в применение которого для тестового диагностирования существенный вклад внесли ученые А.А. Thayse, М.У. Hsiao, М. Davio, R. Vochmann и другие. В работах группы сотрудников в то время Пермского политехнического института (ныне ПНИПУ) под руководством профессора Е.Л. Кона [8] впервые было предложено использовать для целей диагностирования ориентированный *перепад* сигнала и применить для исследований математический аппарат *ориентированных булевых дифференциалов* [4–8]. Позднее для анализа свойств новой группы тестов, названных авторами *импульсными* тестами (oi-тесты), был разработан математический аппарат *сдвоенных ориентированных булевых дифференциалов* (СОБД). Подробнее аппарат СОБД и его применение для синтеза импульсных тестов рассматриваются в соответствующем разделе настоящей статьи.

*Алгоритмическое обеспечение АСТД* имеет своей целью реализацию процедур тестового диагностирования. Для проверки исправности цифровых компонентов аппаратуры ИКС и ИУС одним из наиболее конструктивных признан метод *активизации существенного пути* [1, 8]. Он основан на подаче тестового воздействия от управляемого входа через проверяемую ветвь устройства к наблюдаемому выходу. При этом остальные значения входов устанавливаются так, чтобы гарантировать передачу тестового воздействия (импульса) именно



через проверяемую ветвь. В случае, когда устройство имеет сходящиеся разветвления, требуется построить дополнительные тестовые наборы, которые гарантируют отсутствие в схеме кратного дефекта, компенсирующего дефекты проверяемой ветви. Отсутствие дефектов в проверяемой ветви определяется по совпадению рассчитанных и полученных результатов теста. Как показано авторами, полный проверяющий тест состоит из наборов проверяющих тестов для каждой ветви. Сотрудниками группы были предложены алгоритмы синтеза полных ориентированных вариационных тестов (ov-тестов) поиска константных дефектов в произвольных комбинационных и некоторых видах последовательностных устройств [8]. Анализ диагностических возможностей ov-тестов для РКД показал, что ряд дефектов типа «обрыв» и «короткое замыкание» между электродами вентилей и межсоединениями, а также различные сочетания кратных дефектов из РКД не обнаруживаются. Поэтому в [9, 10] авторами были предложены ориентированные *импульсные* тесты (oi-тесты), свободные от указанных выше недостатков ov-тестов.

Следует отметить, что импульсная форма тестового воздействия oi-тестов позволяет реализовать алгоритм проверки изменения длительности и фазы импульса для выявления дефектов типа «перемычка» («мостиковые» неисправности), влияющих на временные параметры сигналов и схем. Эти алгоритмы предусматривают усложнение процедуры вычисления тестов, дешифрации результатов, но зато позволяют повысить обнаруживающую способность тестов.

*Программное обеспечение АСТД* традиционно состоит из системной и прикладной составляющей. Системное ПО обеспечивает среду выполнения приложений, а также доступ к стандартным функциям (например, ввод-вывод через коммуникационные порты, сетевое взаимодействие и т.п.). Прикладное ПО выполняет такие функции, как анализ схемотехнической модели устройства, вычисление тестовых наборов, управление процедурой диагностирования, дешифрацию результатов и другие функции, сопровождающие процесс тестового диагностирования на соответствующих этапах жизненного цикла ОД.

Базис *аппаратного обеспечения АСТД* может быть реализован на основе микропроцессоров, микроконтроллеров, заказных или полужаказных СБИС, компьютеров. В каждом конкретном случае в зависимости от требований и поставленных задач аппаратный модуль АСТД реализуется в одном из ранее перечисленных вариантов.

Из проведенного анализа очевидно, что автоматизированная система тестового диагностирования представляет собой сложную информационную систему, построенную с использованием самых современных технологий в соответствующих видах обеспечения. Синтез такой системы – актуальная научная и техническая задача.

### **Заключение**

В настоящей статье рассмотрены некоторые частные задачи тестового диагностирования цифровых устройств, реализованных по КМОП-технологии изготовления. Проанализирована диагностическая модель РКД КМОП-компонентов цифровых устройств, учитывающая особенности проявления технологических дефектов. Предложено использовать импульсный вид тестового воздействия, что позволяет обеспечить обнаружение кратных дефектов из РКД, а также перейти к логико-параметрической модели дефектов. В качестве математического аппарата для синтеза импульсных тестов предложен аппарат сведенных ориентированных булевых дифференциалов. Для снижения вычислительной сложности синтеза и реализации алгоритмов тестового диагностирования исследована возможность применения методов контролепригодного проектирования цифровых компонентов аппаратно-программного базиса современных устройств. Решение указанных задач будет способствовать разработке методологии проектирования АСТД аппаратуры ИКС и ИУС. Сформулированы основные задачи и подходы к реализации информационного, алгоритмического, программного и аппаратного обеспечения АСТД.

### **Библиографический список**

1. Пархоменко П.П. Техническая диагностика. – М.: Наука, 1972. – 368 с.
2. Manoj Sachdev, Jose Pineda de Gyvez. Defect-oriented Testing for Nano-metric CMOS VLSI Circuits. – Springer, 2007. – P. 342.
3. Daniel Arumi i Delgado. Enhancement of defect diagnosis based on the analysis of CMOS dut behaviour. Tesi doctoral presentada per a l'obtencio del titol de doctor Universitat Politecnica de Catalunya Departament d'Enginyeria. – Electronica, 2008. – P. 247.
4. Диагностирование расширенного класса дефектов в цифровых схемах / В.В. Белоусов, О.В. Гончаровский, Е.Л. Кон, В.В. Киселев // Вопросы технической диагностики: межвуз. сб. науч. тр. – Ростов н/Д, 1985. – С. 54–59.

5. Кон Е.Л., Киселев В.В. Диагностика дефектов расширенного класса с помощью ориентированных вариационных тестов // Надежность и эффективность комплексов и устройств электронной техники. – Владивосток, 1993. – С. 51–56.

6. Белоусов В.В., Киселев В.В. Диагностика расширенного класса дефектов в ТЭЗах цифровых устройств // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. Вып. 3. – М., 1984. – С. 33–39.

7. Жужгов В.И., Кон Е.Л. Тестовое диагностирование программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) // Проектирование автоматизированных систем контроля и управления сложными объектами: тез. докл. III Всерос. сем. – М., 1990. – С. 10–11.

8. Киселев В.В., Кон Е.Л., Шеховцов О.И. Автоматизация поиска дефектов в цифровых устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1986. – 96 с.

9. Кон Е.Л., Фрейман В.И. Синтез проверяющих тестов для КМОП ИС // Информационно-управляющие системы: межвуз. сб. науч. трудов / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1997. – С. 30–35.

10. Фрейман В.И. Разработка и исследование методов синтеза импульсных тестов для автоматизации проверки КМОП СБИС на этапах изготовления и эксплуатации телекоммуникационного оборудования: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2000. – 114 с.

Получено 06.09.2011