

ОТЛАДКА МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ

1.1 НЕОБХОДИМОСТЬ ОТЛАДКИ АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МПУ

Этапы разработки МПУ. Микропроцессорные средства, входящие в состав РЭС и технологического оборудования, могут существенно отличаться друг от друга сложностью аппаратуры и объемом программных средств. В связи с этим процесс проектирования МПУ может иметь свои особенности в зависимости от роли его функционирования в системе.

Процесс создания МПУ и МПС характеризуется тесной взаимосвязью этапов разработки аппаратного и программного обеспечения и сложностью отладки программ при ограниченном наборе оборудования.

На *первом этапе* (этапе составления ТЗ) производится формализация требований к системе. При этом определяются все внешние связи разрабатываемых микропроцессорных средств, перечисляются функции системы, формализуется ТЗ на систему. На этом этапе возможны ошибки из-за несогласованности требований к системе и неточностей алгоритмов функционирования МПУ.

На *втором этапе* производится разработка структуры и архитектуры системы, а также распределение функций между аппаратными и программными средствами. Выбираются микропроцессорные наборы, на базе которых будет реализована система, определяются взаимодействия между аппаратными и программными средствами. На этом этапе ошибки в проекте могут быть из-за несогласованности протокола взаимодействия аппаратуры и программ, неверного выбора микропроцессорных наборов, неверной интерпретации технических требований и др.

На *третьем этапе* производится разработка и изготовление аппаратных средств и программного обеспечения системы. После определения функций, реализуемых аппаратурой, и функций, реализуемых программами, схемотехники и программисты приступают к разработкам.

Проектирование аппаратных средств включает в себя разработку подробной логической схемы каждого модуля, построение временных диаграмм управляющих сигналов, конструирование каждого модуля на плате, тестирование схем путем прослеживания сигналов и сравнения их с логическими схемами и временными диаграммами и сборку модулей в законченную систему, называемую прототипом.

Разработка программ состоит из разработки алгоритмов, декомпозиции общей программы на подпрограммы, разработки структурной схемы каждого программного модуля, написания программ на языке ассемблера или языке высокого уровня, трансляции с помощью ассемблера или компилятора в объектные модули, создания загрузочных модулей и их автономной отладки, объединения модулей в законченный программный модуль и его отладки.

Основные ошибки, возникающие на этом этапе, следующие. При разработке аппаратуры возможны упущения некоторых функций, недоработка в схемах синхронизации, нарушение правил проектирования, при разработке программных средств — упущения и неверная интерпретация отдельных функций, неточности в алгоритмах и кодировании.

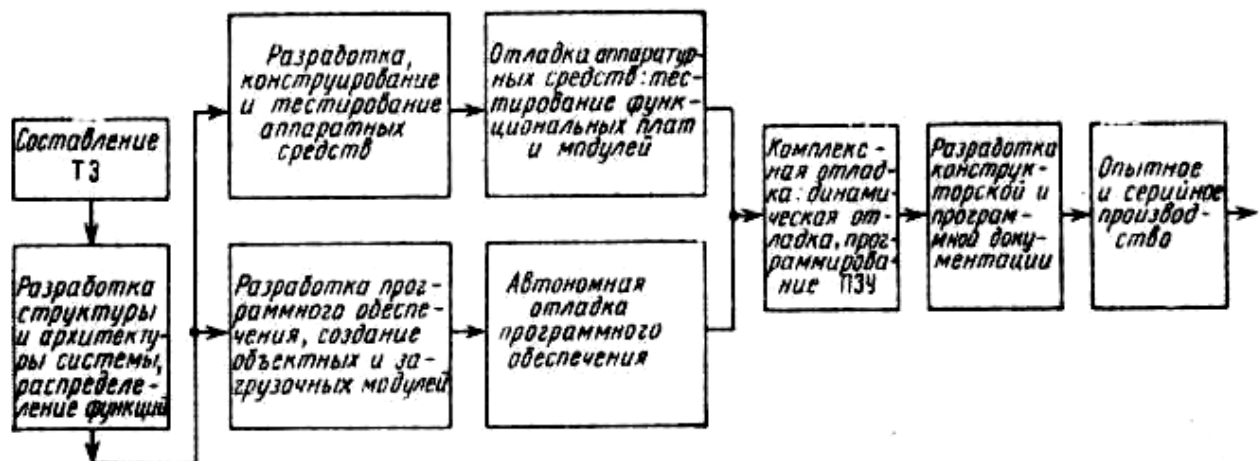


Рис. 4.1. Модель процесса разработки МПУ и МПС

Разработка аппаратных и программных средств МПУ производится параллельно, причем по мере завершения проекта взаимодействие между группами разработчиков становится все более тесным. С помощью кросс-систем, моделирующих программ и систем автоматизированного проектирования можно отладить почти все программы. Однако системные моменты типа прерываний можно проверить только на прототипе.

Окончательный этап проектирования - интеграция прототипа и программы. Прототип здесь еще

может иметь неисправности, поэтому на этом этапе производится комплексная отладка аппаратных и программных средств.

Завершается процесс проектирования разработкой документации, опытным и серийным производством.

Последовательность разработки МПУ и МПС представлена • на рис. 4.1.

Проектирование - итерационный процесс. Неисправности, обнаруженные на этапе приемосдаточных испытаний, могут привести к коррекции всей документации и перепроектированию всей системы.

Методы контроля правильности проекта МПУ. Основными методами контроля правильности проекта МПУ является верификация, моделирование и тестирование.

Под верификацией понимают формальные методы доказательства корректности проекта. Однако они являются довольно трудоемкими для использования в инженерных разработках.

Для контроля корректности проекта МПУ на каждом этапе проектирования необходимо производить моделирование аппаратных и программных средств. При моделировании аппаратных средств широкое распространение получили методы имитационного моделирования.

Имитационное моделирование — метод исследования, основанный на том, что изучаемая динамическая система заменяется ее имитатором и с ним проводятся эксперименты с целью получения информации об изучаемой системе. Напомним, что динамическими являются системы, которые изменяются во времени. Очевидно, МПУ, а вернее законы их функционирования, относятся к классу динамических систем. Имитаторы МПУ, как правило, реализуются в виде программных моделей на ЭВМ.

При имитационном моделировании процессов не требуется преобразовывать аналитические выражения в специальную систему уравнений относительно искомых величин. Для имитационного моделирования характерно воспроизведение на ЭВМ явлений, описываемых математической моделью, с сохранением их логической структуры и последовательности чередования во времени.

Имитационное моделирование МПУ реализуется моделирующим алгоритмом, в соответствии с которым в ЭВМ имитируется функционирование проектируемого МПУ с учетом выбранного уровня детализации для получения нужных характеристик. Эти характеристики выводятся на печать и используются в качестве прямых или косвенных результатов проектирования. Таким образом, в процессе имитационного моделирования проверяется и отлаживается модель проектируемого МПУ.

Для проектирования и отладки программных средств МПУ используются кроссовые, резидентные и комбинированные системы проектирования программ.

Кроссовые системы предназначены для моделирования и отладки и системных и прикладных программ, а также для моделирования и оценки алгоритмов в процессе разработки и эксплуатации МПУ. Широкие аппаратные и программные возможности универсальных ЭВМ позволяют создавать кроссовое математическое обеспечение с помощью языков высокого уровня и использовать мощные резидентные средства отладки. Применение кроссовых средств снижает стоимость и время разработки МПУ.

Кроссовые системы проектирования, однако, имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение:

интерпретация системы команд микропроцессора в кроссовой системе осуществляется сравнительно просто, но моделирование вычислительной среды, в которой работает создаваемое МПУ, требует дополнительных средств и не всегда возможно;

отсутствуют какие-либо возможности отладки аппаратной части МПУ.

В *резидентных системах* программное обеспечение автоматизированного проектирования реализуется на микро-ЭВМ такого же типа, что и проектируемое МПУ, и выполнение разрабатываемой и отлаживаемой программ происходит одновременно с работой системы проектирования. Таким образом, МПУ разрабатывается в реальных или близких к реальным условиям. Однако резидентным системам также свойственны недостатки:

программное обеспечение системы проектирования достаточно сложное, поэтому для создания резидентной системы необходимо иметь некоторые средства разработки (чаще всего кроссовые);

для обеспечения универсальности резидентных систем микро-ЭВМ должна быть оснащена развитым набором периферийного оборудования, что является сдерживающим фактором широкого распространения резидентных систем;

программное обеспечение резидентной системы машин независимо.

Комбинированные (комплексные) системы проектирования представляют собой, как правило,

многопроцессорный комплекс, в котором основные функции системы проектирования реализует универсальная ЭВМ (в том числе и микро-ЭВМ), а остальные аппаратурные средства используются для поддержки различных проектных процедур. Комбинированная система может использоваться как кроссовая система и предоставлять возможности резидентной системы по отладке программ на реальной аппаратуре. Разработчик получает средство для нисходящего модульного проектирования аппаратурной и программной частей МПУ. Начиная с некоторого ядра программного обеспечения, которое полностью интерпретируется системой, можно постепенно достраивать МПУ, добавляя программные модули и перенося функции выполнения на реальные устройства (МП, ЗУ, внешние устройства). При этом используются все возможности программного обеспечения инструментальной ЭВМ, ее периферийное оборудование и вычислительные ресурсы разрабатываемых МПУ.

Роль тестирования при отладке МПУ. Отладка аппаратурных и программных средств связана в первую очередь с поиском неисправностей. Поиск неисправностей в аппаратуре МПУ сильно осложнен целым рядом причин, наиболее важными из которых являются: высокая сложность БИС; малое число контрольных точек схемы, физически доступных для непосредственного контроля и воздействия; неразделимость аппаратуры и программного обеспечения; сложность и неразделимость аппаратуры МПУ на функциональные узлы; необходимость одновременного контроля состояния шин адреса, данных и управления на протяжении значительного временного интервала; особенности архитектурно-структурной организации однокристалльных и микропрограммируемых секционных микропроцессоров.

Усложняет поиск неисправностей и двойственная природа МПУ: если отказ не очевиден, то необходимо решить, скрыт ли отказ в аппаратных средствах или вызван ошибкой в программе. Основным методом поиска неисправностей в МПУ является тестирование.

Принципы тестирования МПУ по существу не отличаются от тестирования обычных цифровых устройств. Для поиска неисправностей и отладки МПУ необходимо определить состав требуемого контрольно-измерительного оборудования и составить логическую схему поиска неисправности. Диапазон контрольно-измерительной аппаратуры для отладки МПУ довольно широк — от обычных осциллографов и цифровых вольтметров до специальных приборов типа сигнатурных и логических анализаторов. Помимо аппаратурных средств для поиска неисправностей в МПУ используются программные средства. Тест программы либо встраиваются в состав программного обеспечения МПУ или МПС и выполняются как часть процедуры включения системы, либо вызываются по мере необходимости из ПЗУ.

Остановимся на основных проблемах тестирования МПУ. Прежде всего, поскольку управление проверкой МПУ скрыто в программах, это затрудняет прослеживание прохождения сигналов. Кроме того, все процессы в МПУ происходят очень быстро, что делает невозможным и наблюдение, и анализ функционирования МПУ в реальном времени. Измерения нужно производить, когда МПУ работает с номинальным быстродействием, что делает невозможным использование традиционных систем контроля.

§ 14.2. МЕТОДЫ ТЕСТИРОВАНИЯ МПУ

Задачи тестирования. Особенности организации процесса обработки информации, введение новых технологических операций на стадии производства и оригинальные схмотехнические решения позволяют выделить МПУ в особый класс цифровых устройств, требующих разработки специальных процедур определения их работоспособности. Это, однако, не означает отказ от широко применяемых в настоящее время методов обнаружения и поиска неисправностей цифровых устройств. Целесообразным представляется подход, основанный на бугага© оптимальном использовании результатов, полученных за последние годы в области контроля и технической диагностики, с учетом особенностей архитектуры и логики функционирования МПУ.

Под тестированием МПУ будем понимать процесс установления исправности или работоспособности устройства с помощью определенных входных воздействий и анализа соответствующих выходных реакций. Тестирование является одной из основных процедур технической диагностики (контроля), задачами которой являются определение технического состояния объекта контроля и, в случае его неработоспособности — обнаружение и локализация неисправностей.

Совокупность входного воздействия и соответствующей ему выходной реакции называется тестом, а упорядоченная последовательность тестов — тестовой программой. Процедура контроля МПУ состоит из разработки тестовой программы, последующей подачи входных воздействий на контролируемый прибор, наблюдения выходных сигналов и анализа полученных результатов с целью

установления годности изделия. Процедура контроля обеспечивает полный (неполный) контроль МПУ, если она обнаруживает любую (не обнаруживает хотя бы одну) неисправность рассматриваемого класса нарушений. Полнота контроля является одним из основных требований, предъявляемых к разрабатываемой тестовой программе устройства. Другим, противоречащее первому требованию, является максимизация скорости контроля, что обычно интерпретируется как минимизация длины тестовой программы. В зависимости от того, что является исходной информацией для создания тестовой программы МПУ, различаются два вида контроля: функциональный и структурный.

При *функциональном контроле* в качестве исходной информации для построения тестовой программы используется алгоритм функционирования МПУ. Необходимость функционального контроля вызывается отсутствием полной информации о причинах отказов, повышенной сложностью контролируемого устройства, пониженными требованиями к полноте контроля и т. п. Функциональный контроль чаще всего применяется пользователями МПУ. На стадии производства функциональный контроль используется главным образом для проверки полупроводниковых ЗУ.

Методы построения тестов для *структурного контроля* ориентируются на принципиальную схему (структуру) проверяемого МПУ. Они используются главным образом для контроля простейших МПУ или даже отдельных узлов таких МПУ на стадии производства. Эти методы в настоящее время разработаны наиболее полно и на практике зарекомендовали себя при контроле и диагностике устройств, состоящих из типовых элементов замены (ТЭЗ). Структурные методы, как правило, обеспечивают достаточную полноту контроля. Однако они малоэффективны при отсутствии адекватных моделей некоторых характерных для МПУ нарушений и в случае проверки сложных схем, насчитывающих тысячи логических и запоминающих элементов.

В зависимости от детализации рассмотрения МПУ как объекта тестового контроля различают модульный и системный подходы.

Модульный подход предусматривает разбиение МПУ на блоки (модули), для которых по отдельности определяются тестовые программы. Полученные тестовые программы блоков соответствующим образом объединяются (склеиваются), образуя тестовую программу всего МПУ. Одной из распространенных разновидностей модульного подхода является метод «раскрутки», сущность которого заключается в выборе определенной последовательности проверки отдельных блоков МПУ, позволяющей в первую очередь установить исправность узлов МПУ, нарушение функционирования которых может влиять на достоверность результатов контроля последующих узлов.

Модульный подход обладает тем преимуществом, что сложная структура МПУ рассматривается как композиция более простых структур, для которых трудоемкость построения тестов может быть значительно меньше, чем для всего устройства в целом. Недостатком этого подхода является то, что исправная работа составляющих узлов не гарантирует правильность работы МПУ.

Системный подход предполагает, что МПУ является единым законченным функциональным устройством, для которого строится тестовая программа.

Из сказанного следует, что при модульном и системном подходе могут быть использованы и функциональные, и структурные методы контроля.

Особенности тестового контроля **МПУ**. Формализация методов построения тестов требует разработки математических моделей технических устройств как объектов диагноза и моделей неисправностей, характерных для этих объектов.

Построение моделей, адекватно описывающих функционирование объектов диагноза в условиях возможных нарушений, требует глубокого исследования структуры, логики работы и анализа причин, выбывающих отклонение алгоритма функционирования от заданного. Сравнительно небольшой срок, прошедший со дня выпуска первого микропроцессора (1971 г.), не дает оснований утверждать, что адекватная модель МПУ получена.

Основные трудности при разработке МПУ, следующие:

МПУ резко различаются по структурной организации, функциональным возможностям, назначению, принципу действия и т. п. Каждому из этих узлов соответствует, как правило, свой класс возможных неисправностей, что затрудняет получение единой модели неисправности, охватывающей все возможные нарушения работы МПУ;

достигнутая современной технологией производства степень интеграции (плотность компоновки элементов на кристалле) вызвала появление нарушений, связанных со взаимным влиянием соседних элементов. Часть причин, вызывающих нарушение логики функционирования, остается невыявленной. Все это затрудняет получение подходящих моделей неисправностей МПУ;

большая часть процесса обработки информации в МПУ недоступна для наблюдения извне, что в

значительной степени затрудняет установление причины отказа;

по мнению некоторых специалистов, если неисправности логических схем достаточно хорошо описывались моделью константных логических неисправностей в линиях, т. е. «катастрофическими» отказами, то в МПУ на первый план выступают постепенные отказы в результате изменения электрических параметров;

нарушения в работе МПУ могут быть вызваны как отказами аппаратуры, так и ошибками, допущенными при составлении программы, а также совокупностью этих причин;

работа МПУ требует высокой степени согласованности временных параметров функциональных узлов. Рассогласование временных сигналов может вызвать сбои в работе, необходимость учета которых ведет к усложнению модели МПУ.

Поясним сказанное. Сложность тестирования типичной микросхемы оценим на примере микропроцессора КР580ВМ80А. Система его команд состоит из 78 базовых команд ($m = 78$), длина слова данных $n = 8$, общее число тест-комбинаций для проверки МП с учетом всех возможных двоичных наборов для каждой команды определяется равенством $C = 2^{mn} = 2^{8 \cdot 78} = 2^{624}$, что в десятичной системе счисления составляет величину $C = 10^{187,84}$. Предположим, что каждый тест длится 1 мкс (значение почти недостижимое для МП КР580). Тогда на проведение всех тестов потребуется $10^{181,84}$ или $3,171 \cdot 10^{174-84}$ лет. Нетрудно оценить реальную достижимость полного контроля такой микросхемы, если примерный возраст Земли оценивается в $4,7 \cdot 10^9$ лет. Из-за невозможности полного контроля микросхемы микропроцессора проводится ее функциональное тестирование, при котором каждая функция проверяется с привлечением ограниченного множества двоичных наборов.

Простейший вид тестирования МПУ в условиях эксплуатации — проверка центрального процессора МПУ в режиме свободного счета. При этом определяется правильность считывания команды с шины данных, формирования адресных наборов на шине адреса и корректность реагирования на сигналы системной синхронизации. Контролируя сигналы в линиях системной шины, можно частично проверить шину управления. Обычно при проверке в условиях эксплуатации центральный процессор МПУ считается работоспособным, если он функционирует в режиме свободного счета. При отказе центрального процессора МПУ для обнаружения и локализации неисправности необходимо использовать другую вычислительную систему. Поэтому большинство сложных контрольно-измерительных приборов для проверки МПУ сами имеют встроенные микропроцессоры.

§ 14.3. СРЕДСТВА ОТЛАДКИ АППАРАТУРЫ МПУ

Для технического обслуживания и отладки аппаратурных средств МПУ может применяться обычная контрольно-измерительная аппаратура (осциллографы, цифровые вольтметры, частотомеры и др.), ручные инструментальные средства (логические пробники, логические компараторы и др.), логические анализаторы, сигнатурные анализаторы и эмуляторы.

I. Обычные контрольно-измерительные приборы

Под обычной контрольно-измерительной аппаратурой будем понимать приборы, которые использовались для контроля электронных схем до появления микропроцессоров — осциллографы, цифровые вольтметры и частотомеры.

На первых этапах отладки аппаратуры МПУ может быть использован *осциллограф*. С помощью осциллографа можно проверить работу источников питания, тактового генератора, а также правильность функционирования микропроцессора, наблюдая осциллограммы на его выходных шинах при циклическом повторении несложной последовательности из нескольких команд. Проверка периодических сигналов в МПУ возможна с помощью осциллографа, поскольку после согласования частоты периодического сигнала и скорости развертки на экране осциллографа появляется неподвижное изображение вследствие наложения друг на друга последовательных сигналов.

Ограниченность использования осциллографов при отладке МПУ объясняется тем, что в МПУ при выполнении программ нет периодических сигналов. Поэтому при индикации на осциллографе видны почти случайные последовательности двоичных сигналов, которые интерпретировать практически невозможно.

Для контроля редких и однократных сигналов применяются *запоминающие осциллографы*, которые при запуске воспринимают входной сигнал и индицируют его либо до естественного затухания, либо до стирания с целью воспроизведения нового сигнала. В современных запоминающих осциллографах информация о входном сигнале преобразуется в цифровую форму и хранится в ЗУПВ. Для индикации на электронно-лучевой трубке информация о сигнале преобразуется в аналоговую форму. Хранимые в ЗУПВ цифровые значения не подвержены затуханию и изображение на экране

может индцироваться практически сколь угодно долго. Осциллографы с цифровым хранением информации называют *цифровыми осциллографами*.

В микропроцессорных РЭС *цифровые вольтметры* применяются для измерения напряжений питания и потребляемых токов. Из-за малого быстродействия преобразователей, входящих в состав цифровых вольтметров, последние не обнаруживают быстрые выбросы напряжения, которые возникают в МПУ при отказах.

Для измерения частоты генератора синхронизации МПУ, а также для измерения временных интервалов используются *частотомеры*. С их помощью можно определять продолжительность управляющего сигнала, посылаемого в выходной порт, следовательно, частотомер может являться средством проверки правильности программы, которая формирует этот сигнал.

Ограниченность применения обычных контрольно-измерительных приборов при отладке микропроцессорных РЭС объясняется невозможностью одновременного контроля ими параллельного представления информации в магистралях МПУ и высокой скоростью изменения информации.

2. Ручные инструментальные средства

Ручные инструментальные средства применяются при проверке МПУ путем реализации проверок по принципу «стимул—реакция». К ним относятся логические пробники, пульсаторы, компараторы, бесконтактные индикаторы тока и т. д.

Для обслуживания логических анализаторов всех видов требуются операторы высокой квалификации, умеющие интерпретировать достаточно большие массивы выходных данных, имеющие хорошее представление о работе проверяемого устройства и владеющие методами отыскания неисправностей.

3. Внутрисхемные эмуляторы

Эмуляция процесс, в котором одна система используется для копирования действий другой системы. Для организации эмуляции различных компонентов разрабатываемого МПУ используются *внутрисхемные эмуляторы*. Они предназначены для организации комплексной отладки аппаратуры и программного обеспечения МПУ в процессе разработки. Промышленностью выпускаются эмуляторы в виде автономных приборов, которые входят в состав тестеров, предназначенных для функционального контроля МПУ в процессе производства и эксплуатации изделия. В функции внутрисхемного эмулятора входят эмуляции поведения микропроцессора и ЗУ проектируемого МПУ, периферийных устройств и различных контроллеров МПУ, управление поведением проектируемых микропроцессорных РЭС. При отладке МПУ на однокристалльных МП с фиксированной системой команд необходима организация генерации программных воздействий на различные компоненты МПУ. Для отладки МПУ на микропрограммируемых МП помимо внутрисхемного эмулятора требуется имитатор ПЗУ с записанным в нем набором микропрограмм.

Внутрисхемный эмулятор может работать в режимах опроса состояния различных узлов МПУ, пошагового исполнения программы (микропрограммы) пользователя и эмуляции исполнения программы (микропрограммы) пользователя в реальном времени. С помощью эмулятора проверяются ядро МПУ, магистрали, а также выполняются тесты ПЗУ и ЗУПВ.

Внутрисхемные эмуляторы весьма эффективны при обработке и проверке микропроцессорных схем. При этом методе применяется внешняя по отношению к проверяемому прибору система для имитации МП и обеспечивается диагностика отказов при функционировании в реальном времени. Использование сменных узлов позволяет легко адаптировать прибор к конкретному типу МП. Для такой аппаратуры требуется персонал высокой квалификации, но она не позволяет диагностировать источники неисправностей с точностью до компонента. При объединении методов и аппаратных средств внутрисхемной эмуляции и сигнатурного анализа появляется возможность создать чрезвычайно мощное средство для проверки цифровых микропроцессорных схем. С помощью внутрисхемного эмулятора анализатор вырабатывает цифровые коды, благодаря чему оказывается возможным проверять фактически неработающую схему. Единственное, что необходимо для выполнения проверки, это функционирование генератора тактовых сигналов проверяемой системы. Микропроцессор анализатора подключается с помощью кабеля эмуляции вместо микропроцессора проверяемой системы. В ППЗУ анализатора хранятся программы испытаний. Анализатор должен иметь разные режимы запуска для выполнения программ с целью проверки содержимого регистров ячеек памяти, а также правильности функционирования устройств ввода - вывода. Встроенные в анализатор средства сигнатурного анализа позволяют отыскивать неисправные компоненты.

Оценивая рассмотренную аппаратуру и реализованные в ней методы диагностики, можно сделать заключение, что наиболее простыми в применении приборами, позволяющими производить

высококачественную и быструю проверку сложных цифровых устройств в условиях производства и эксплуатации, являются приборы, использующие метод сигнатурного анализа. К тому же это пока единственный метод, позволяющий локализовать поиск неисправных компонентов в микропроцессорных схемах. Этот метод применим для цифровых, аналоговых и аналого-цифровых схем.