

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Стоимость контроля качества электронного изделия играет серьезную роль на всех этапах его жизненного цикла – проектирования, производства, эксплуатационного обслуживания. Однако реального представления полной экономической картины контроля нет, и это препятствует правильному определению эффективности всего производства. Несмотря на огромное число исследований стоимости автоматизированной аппаратуры контроля, включая стоимость операций, обучения операторов, технического обслуживания и т.д., на многих предприятиях прозрачна только стоимость приобретения аппаратуры. Ситуация напоминает айсберг. Поэтому различные подходы к оценке экономической эффективности контроля представляют большой интерес.

Несмотря на непрерывное и существенное совершенствование автоматизированной контрольно-измерительной аппаратуры (АКИА), огромный рост сложности ИС всегда идет впереди. Известно, что по закону Мура число транзисторов ИС удваивается каждые 18 месяцев, а ее стоимость падает. Однако стоимость АКИА не следует данному закону и постоянно растет. Если с 1983 года по настоящее время стоимость изготовления транзистора упала с 0,1 до менее 0,001 цента, то стоимость тестирования каждого транзистора остается примерно на одном уровне – около 0,00001 цента (рис.1). Ассоциация полупроводниковой промышленности США прогнозирует, что скоро стоимость контроля качества транзистора даже превысит стоимость его изготовления.

Стоимость АКИА остается высокой, потому что полупроводниковая промышленность опирается на действующий функциональный контроль. Каждое поколение ИС приносит рост числа выводов и необходимость в большей скорости и точности контроля, так что изготовителям часто приходится заменять установленную у себя АКИА. К тому же сегодня большинство ИС выполняются в виде системы-на-чипе. Такие ИС могут содержать множество IP-блоков (блоков «интеллектуальной собственности»), требующих различных алгоритмов, последовательностей импульсов, областей синхронизации, напряжений питания, что еще более усугубляет



Э.Рувинова

проблему экономической эффективности контроля. Рост стоимости контроля при том, что цена ИС падает, делает его основным фактором стоимости в разработке новых ИС.

В то же время наблюдается заметное сокращение экономического срока службы ИС – часто они устаревают через 12 месяцев, а то и раньше. В связи с этим изготовителям ИС приходится искать пути снижения суммарного времени, уделяемого контролю. Сегодня при производственном контроле качества на генерацию тестовых векторов с соответствующим покрытием неисправностей расходуется свыше 40% цикла разработки ИС – больше, чем на любой другой этап (рис.2). И по мере роста сложности ИС увеличивается и время, необходимое для ручной генерации функциональных тестовых векторов. Так, специалисты фирмы Intel утверждают, что каждое новое поколение микропроцессоров требует почти в два раза большего объема работ ручной генерации тестовых векторов, чем предыдущее.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ИС

Индустрия контроля постоянно ведет поиски инноваций, повышающих производительность АКИА и устраняющих ее экономическую неэффективность. Испытанный и реалистичный способ повышения производительности – это многопозиционный контроль, т.е. контроль множества приборов одновременно – до 32 и даже 64. Однако обычно тестер имеет ограниченное число генераторов тестовых последовательностей, цифровых и аналоговых выводов. Для одновременной проверки большего числа приборов требуется больше ресурсов для тестера, создание специальных приспособлений для поддержания множества приборов и разработка необходимых тестовых программ. Но даже в этом случае метод одновременного тестирования с трудом распространяется на рынке, где стоимость контроля огромна по сравнению со стоимостью производства.

Новым перспективным способом повышения эффективности тестера является **параллельный контроль**, который обеспечивает

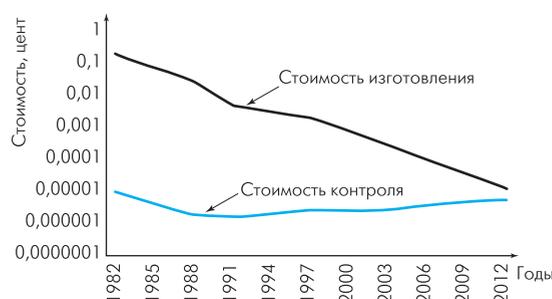


Рис.1. Изменение стоимости изготовления и контроля транзистора ИС

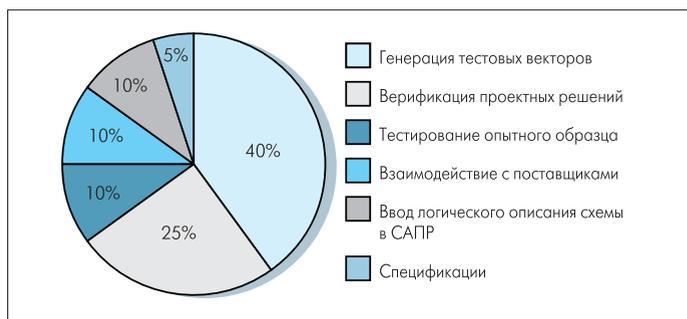


Рис.2. Время, необходимое для различных этапов разработки ИС

одновременный контроль различных IP-блоков внутри иерархической структуры системы-на-чипе. Проверая одновременно множество IP-блоков, метод позволяет сокращать время контроля до тех пор, пока ресурсы тестера используются полностью. По мере роста сложности ИС параллельный контроль становится все более эффективным и тем самым создает осуществимый способ для приведения стоимости контроля в соответствие с законом Мура даже при росте интеграции системы-на-чипе. Метод идеален для проверки сложных ИС новых технологий, таких как приборы Bluetooth, где ВЧ-, аналоговые и цифровые схемы объединены в одной системе-на-чипе.

Параллельный контроль наиболее успешно осуществляется при гибкой тестовой архитектуре процессор-на-вывод в противоположность традиционной архитектуре с разделением ресурсов, используемой в большинстве тестеров. При этой архитектуре каждый вывод обеспечивает полный диапазон режимов тестера, включая синхронизацию, сканирование, встроенный самоконтроль, функциональный контроль, генерацию тестовых последовательностей, сбор и ввод цифровых данных. Такая гибкая организация позволяет группировать выводы в виртуальные порты для контроля IP-блоков. Каждый порт может вести себя так, как если бы он был независимой машиной со своими периодами тестирования и инструкциями подпрограмм. После выполнения контроля выводы тестера могут быть немедленно перестроены и сгруппированы в порты новой конфигурации для проведения совершенно другого набора тестов.

При многопортовой архитектуре дорогие, с высокими параметрами ресурсы могут сочетаться с более дешевыми ресурсами на базе вывода, что снижает стоимость тестера. Например, если система-на-чипе работает только с двумя или тремя сигналами со скоростью 1 Гбит/с, а остальные сигналы имеют частоту ниже 200 МГц, то для ее контроля требуется единственный вывод с высокими параметрами и ряд более дешевых выводов.

Для выполнения параллельного контроля процессор-на-вывод поддерживается программой, которая разделяет тестирование каждого IP-блока. В результате проводится одновременно множество тестовых программ на одном и том же приборе при сосредоточении каждой тестовой программы на одном входе/выходе.

Для повышения эффективности тестера параллельный контроль можно использовать совместно с многопозиционным. Например, при одновременном контроле четырех приборов в каждом из них шесть IP-блоков проверяются параллельно. В результате вместо четырехкратного увеличения производительности при многопозиционном контроле такая комбинация приводит к ее увеличению в 24 раза и соответственно – к снижению стоимости.

Чтобы решить проблемы контроля субмикронных ИС, изготовителям необходимы новые идеология и аппаратура контроля. Многие из них проводят и структурный, и функциональный контроль на

высококачественных тестерах общего назначения. Но использование этого способа связано с большими капитальными вложениями, низкой капиталоотдачей и быстрым устареванием оборудования. Поэтому требуется сдвиг к **стратегии распределенного контроля**, при которой слишком растянутый структурный контроль перейдет от дорогой АКИА к более дешевым платформам тестирования контролепригодных приборов. Это снизит расходы на АКИА и сократит сроки разработок ИС при том, что сложность их будет расти.

Зачем разделять эти виды контроля? Функциональный контроль гарантирует, что прибор работает правильно. Структурный подтверждает правильность изготовления базовых элементов – выводов, вентиляей, транзисторов. Он основывается на моделях дефектов, которые могут присутствовать в контролируемом приборе. Структурный контроль требует намного меньше инженерных ресурсов, чем функциональный, который остается для большинства компонентов ручным процессом. Автоматическая генерация тестовых векторов для структурного контроля происходит в течение часов, в то время как объем ручных работ для функционального контроля составляет недели, месяцы или годы.

Отделение процессов структурного контроля от дорогой АКИА, используемой для функционального контроля, обусловит применение более дешевых платформ для структурного тестирования, которые будут взаимодействовать с контролепригодными приборами и процессорами встроенного самоконтроля. В результате потребуются меньшее число обычных АКИА для функционального контроля, так как они нужны только для проверки приборов, прошедших структурный анализ.

Переход к стратегии распределенного контроля не прост. Он требует изменения правил проектирования контролепригодных приборов таким образом, чтобы можно было использовать более дешевые платформы АКИА для структурного контроля. Необходимо усовершенствовать моделирование дефектов, чтобы максимизировать их обнаружение с помощью методов структурного контроля. К таким изменениям должны подготовиться все службы управления качеством.

Заметно снизить стоимость контроля ИС может АКИА, предназначенная для **тестирования контролепригодных приборов**. Сейчас – как раз время для нового серьезного шага в развитии такого контроля, но это потребует проведения большого объема работ.

Следует отметить, что проектирование контролепригодных изделий продвигается медленно, уже в течение многих лет. Революционную роль в его развитии должно сыграть создание системы-на-чипе, так как такая ИС не имеет достаточного доступа к выводам для тестирования всех внутренних схем с помощью обычного функционального метода. Одно из основных преимуществ проектирования контролепригодных приборов состоит в том, что оно способно сделать весьма различную продукцию как бы однородной – благодаря использованию стандартных тестовых интерфейсов. Современные дорогие высококачественные тестеры используют приспособления одного размера для всех контролируемых приборов, и каждый прибор “платит” за все параметры тестера, независимо от того, нужны они ему или нет. Правильное проектирование контролепригодных приборов может резко сократить требования к параметрам АКИА. Контролепригодность приборов снижает стоимость контроля еще и благодаря возможности высокой степени параллелизма. Сопоставление параметров обычного и гипотетического тестера, предназначенного для контролепригодных приборов, показывает преимущества последнего (см. таблицу).

Сравнение параметров АКИА – обычной и для контролепригодных приборов

Параметр	Обычная АКИА	АКИА для контролепригодных приборов
Стоимость на вывод, долл.	1–6 тыс.	200–300
Число параллельных контролируемых приборов, шт.	1–8	1–32
Векторная память, млн. команд/вывод	8–16	32–64
Архитектура ЗУ	Специализированная на вывод	Реконфигурируемая
Быстродействие при передаче данных, МГц	100–400	50–100
Тактовая частота, МГц	100–400	200
Источники питания, шт.	4–8	Свыше 32

По прогнозу, к концу 2001 года на открытом рынке должны были появиться первые тестеры для контролепригодных приборов.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ

Для поддержания производства печатных узлов (ПУ) на передовом уровне очень важно точно определить, как на него влияют огромные изменения, происходящие в мире электроники, а именно удвоение параметров электронных устройств каждые 18 месяцев, ежедневное введение новых технологий, совершенствование коммуникаций и т.д. Необходимо установить те этапы процесса сборки и контроля качества, которые испытали наибольшее воздействие этих изменений, и добиться оптимизации по стоимости, качеству и объему продукции.

Неправильное представление об истинном состоянии процесса сборки становится причиной того, что серия дорогих его операций вносит дефекты в конечную продукцию. Операции сборки связаны с еще более дорогостоящей серией операций контроля – внутрисхемного и функционального. Хотя многие факторы влияют на стоимость изделия при его контроле, важно реализовать основной принцип контроля: дефекты должны быть обнаружены, по возможности, на самых ранних этапах технологического процесса. Идентификация дефекта и ремонт на уровне ПУ может стоить в 10 раз больше, чем решение этой проблемы на стадии отдельного компонента. Если перенести идентификацию того же дефекта и ремонт до полной сборки системы, можно ожидать увеличения стоимости еще на порядок. А если довести до того, что дефект выявится у заказчика, это увеличит стоимость еще в десять раз.

Для определения наиболее эффективных методов контроля надо гарантировать, что они совместимы с существующими и перспективными технологиями изготовления продукции и технологическими требованиями. По каждому методу должны быть даны ответы на следующие вопросы: пригоден ли он для обнаружения спектра дефектов, присущего конкретному производству; какое качество диагностирования им обеспечивается; каково идеальное положение в технологическом процессе (ТП) определенной операции контроля; какова стоимость полного жизненного цикла продукта, приведенная к данной операции; удовлетворяет ли метод требованиям производительности и требованиям существующей и перспективной технологии; обеспечена ли возможность (например, условия окружающей среды) использования этого метода.

Оптимальное размещение различных операций контроля по ТП приведет к получению продукции высшего качества при минимальной стоимости. Большинство фирм исторически приняли практику, по которой сборка ПУ и исчерпывающий функциональный контроль проводятся до построения системы. Чтобы выработать стратегию контроля, необходимо выяснить, как взаимодействуют спектр неис-

правностей, эффективность контроля, выход продукции, ритм выпуска, ассортимент продукции, затем тщательно исследовать каждый дефект и оценить вероятность его возникновения в данном ТП. После того как стратегия выработана, следует тщательно проверить ее устойчивость. Простейший путь этой проверки – слегка изменить один или несколько ключевых параметров, и, если она останется стабильной, ее можно осуществлять без риска больших и дорогих исправлений.

Пользователи АКИА для контроля ПУ и систем поняли, что предотвратить возникновение дефекта намного выгоднее, чем устранить его. А статистические методы управления качеством и многие составляющие программы тотального менеджмента качеством позволяют усовершенствовать производственный процесс и, таким образом, снизить стоимость проверки, ремонта и повторного контроля. Использование информации, получаемой АКИА, для предупреждения дефектов и управления самим ТП может привести к эффективной стратегии проектирования, сборки, контроля и сбора данных для фирмы.

В этом случае единственная станция, выполняющая полный контроль, обычно дорога. Ее трудно устанавливать и обслуживать, она неэффективна для обнаружения и диагностирования всех типов дефектов и слишком отдалена от истинного места возникновения дефекта, чтобы быть эффективным средством управления ТП. Для многих производителей ПУ стала обязательной концепция распределенного контроля: расположение пунктов контроля ближе к началу ТП и, по возможности, близко к месту возникновения дефекта; использование данных для активного управления ТП, который генерирует дефект; динамическое управление разработкой и применением контроля для обеспечения полного покрытия дефектов с минимальной избыточностью. Используя АКИА таким образом, можно при традиционном внутрисхемном и функциональном контроле динамически управлять ТП и иметь возможность снижать стоимость, повышать качество продукции, сокращать объем резервного контроля.

Чтобы поддерживать конкурентоспособную позицию в производстве ПУ, нужно точно знать расходы за срок службы выбранной стратегии контроля. Анализ можно выполнить для принятого на данном предприятии усредненного ПУ. При этом надо рассматривать такие факторы, как число активных компонентов; размер партии ПУ; срок до выхода на рынок; ежедневный ритм производства; объем конструктивных изменений; осуществляемая технология; затраты на перемещение материально-технических запасов; спектр

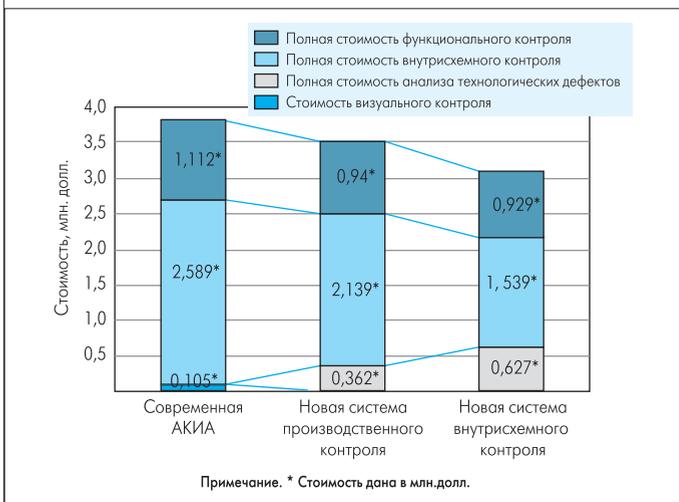


Рис.3. Полная стоимость процесса контроля ПУ

дефектов; требования к качеству процесса контроля; стоимость АКИА; издержки производства; заработная плата; техническое обслуживание; ожидаемое воздействие на последующие ТП; незавершенное производство; обучение операторов; расходы на программирование; стоимость приспособлений и т.д.

После тщательного подсчета стоимости и установления взаимодействия каждого из этих факторов может быть разработана базовая модель стратегии контроля. Анализ прибыли на инвестированный капитал и окупаемости теперь становится очень прост. Если базовая модель установлена с хорошим знанием процесса контроля, определение его стоимости – простая задача (рис.3).

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВСТРОЕННОГО САМОКОНТРОЛЯ

Производители ИС оценивают стоимость встроенного самоконтроля и его экономический эффект на уровне пластины, системы-начипе, IP-блока и ИС, основываясь на чистой прибыли. Производители ПУ обычно концентрируют внимание на экономических аспектах периферийного сканирования и встроенного самоконтроля на уровне платы, хотя им также следует рассматривать прибыль, получаемую от встроенного контроля на уровне ИС. Встроенный контроль на уровне платы – явление относительно новое. Он интегрирует контроль на уровне ИС, периферийное сканирование и логический встроенный самоконтроль на уровне платы. Производители систем рассматривают встроенный контроль на уровне системы, платы и ИС (рис.4).

Экономический анализ встроенного контроля должен рассматривать и его преимущества, и расходы на него. Преимущества – это лучший тестовый доступ; высокое обнаружение дефектов и диагностирование; более высокий выход годных контролируемых из-

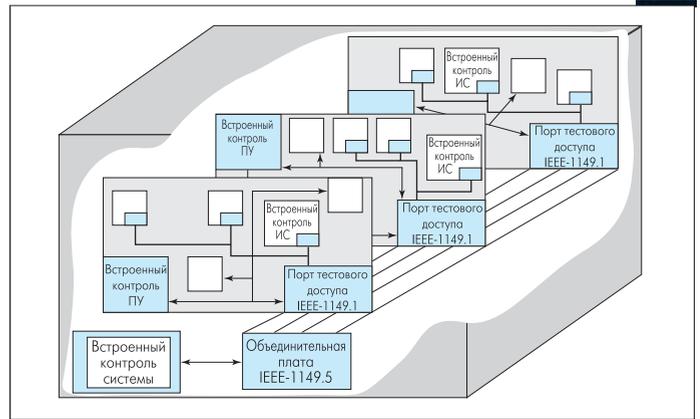


Рис.4. Иерархия встроенного контроля (чистые квадраты показывают компоненты без периферийного сканирования)

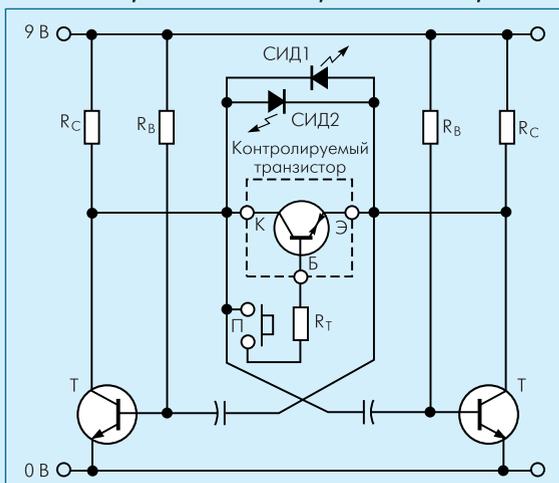
делий; снижение стоимости разработки тестовой программы; меньшая зависимость от АКИА; сокращение срока выхода на рынок; многократное использование теста; увеличение дохода. Расходы связаны с проектированием; реализацией; накладными расходами; контрольно-измерительным оборудованием, в том числе АКИА; технологией встроенного самоконтроля и дополнительными средствами; отказами, обусловленными встроенным самоконтролем и ложными тревогами.

www.evaluationengineering.com/archive/articles/0102con.htm
www.tmworld.com/articles/2001/11_distributed.htm
www.circuitsassembly.com/story/OEG20011204S0037
 IEEE Design & Test of Computers, 2001, September-October, p.60–79.

Карманный тестер

Швейцарские специалисты предлагают миниатюрный тестер для проверки транзисторов (рис.). Прибор, уместающийся в кармане, легко, быстро и просто устанавливает рабочую полярность (*n-p-n* или *p-n-p*) и работоспособность транзистора без учета таких параметров, как усиление и частотная характеристика. Контролируемый транзистор подсоединяется между коллекторами транзисторов (Т) несинхронизированного мультивибратора, так что напряжение $U_{кз}$ может попеременно изменяться с положительного на отрицательное и наоборот. Два СИД, подключенные встречно-параллельно между коллектором (К) и эмиттером (Э) контролируемого транзистора, поочередно светятся в течение времени, когда транзистор заперт. С помощью переключателя (П) можно присоединять базу (Б) транзистора к цепи коллектора. Результаты режимов тестера приведены в таблице.

Электрическая схема карманного тестера



Результаты тестирования транзистора

Тест	СИД1	СИД2	П	Результат
1	Вкл.	Выкл.	Выкл.	Неправильное соединение? Инвертирование К и Б
2	Выкл.	Вкл.	Вкл.	Неправильное соединение? Инвертирование К и Б
3	Выкл.	Выкл.	Выкл.	Контролируемый транзистор закорочен
4	Вкл.	Вкл.	Выкл.	Транзистор ОК, если тесты 5 и 6 – ОК
5	Вкл.	Выкл.	Вкл.	Транзистор – <i>p-n-p</i> -типа
6	Выкл.	Вкл.	Вкл.	Транзистор – <i>n-p-n</i> -типа

Тестер позволяет также проверять полевые транзисторы, маломощные тиристоры и симисторы. На контролируемый прибор можно оказывать воздействие через подсоединенные провода или соединитель стандарта DIN.
www.e-insite.net/ednmag/index.asp