

Предисловие

Для того, чтобы написать большую
книгу, надо выбрать большую тему.
Герман Мелвилл. «Моби Дик»

The reliability and maintainability
Odyssey continues
*Тезис Международного симпозиума
по надёжности RAMS. Сиэтл, 2001*

...Проблема природы случайности очень
коварна и до сих пор вызывает бесконечные
ожесточённые споры.
Стаффорд Бир. «Искусство управления»

Причиной, побудившей написать книгу на известную тему оценки надёжности как свойства качества технических устройств, стало то, что в области электронной техники, по мнению автора, существует положение, которое можно назвать «ножницами» расчёта надёжности. В рамках этих «ножниц» существуют известные абстрактность, вероятность проявления случайности, неоднозначность, нечёткость, условность среднестатистических данных о надёжности для дискретных и интегральных схем малой степени интеграции. Для этих компонентов, с учётом сказанного, существует общепринятая методология оценки их надёжности. Но для больших и сверхбольших цифровых интегральных микросхем повышенной надёжности указанных статистических данных нет, отсутствует и методология оценки надёжности субмикронной электроники. Зато в этом случае выявляется критерий индивидуальной, количественно детерминированной функциональности выходных данных, полученных при тестировании микросхем. Именно использование такого рода данных мы и пред-

лагаем для сведения упомянутых «ножниц». Сделать это можно путём включения статистических массивов информации, полученных при тестировании объектов субмикронной микроэлектроники, в сферу инженерной оценки их качества и надёжности.

Принимая функциональную устойчивость в качестве критерия качества и надёжности микроэлектроники, необходимо учитывать, что такого понятия в научно-технической литературе еще не существует. Поэтому в ходе анализа сложившейся ситуации приходится мыслить новыми категориями, а положения ГОСТов или общепринятые термины и определения использовать только в тех случаях, когда это возможно. Эта особенность материала исследования учтена в представленном далее словаре, в котором сформулирована этимология новых понятий. Синтез появившихся возможностей оценки качества микросхем по его важнейшему, развёрнутому во времени свойству, а именно по надёжности, выполнен в работе с использованием принятых новых понятий. В этом смысл введения нами нового критерия функциональной устойчивости (ФУ) цифровых сверхбольших интегральных схем (СБИС), что является достаточно большой самостоятельной темой, входящей в единую систему положений количественных критериев всеобъемлющей теории надёжности для всей электронной компонентной базы (ЭКБ), вне зависимости от функционального назначения и сложности компонентов. Особенно актуальна эта тема в условиях широкого использования импортных СБИС.

Отметим, что самой необходимости количественной оценки такого технического критерия, как ФУ, ранее не существовало. Она выходит на первый план исключительно при повсеместном тестировании СБИС в сфере оценки стойкости цифровой техники, в том числе и в условиях различных внешних воздействий.

Представленные в работе в качестве инженерной методологии разработки вносят вклад в теорию надёжности применительно к ЭКБ в разделы «Параметрическое направление теории надёжности» и «Физико-математическое направление теории надёжности». При этом они обеспечивают совершенствование существующей практики оценки надёжности компонентов по трём из четырёх её главных составляющих. Во-первых, это расширение основ методологии оценки надёжности, включая общие подходы к оценке надёжности и соответствующие экспериментальные методы. Во-вторых, это исследование ограничений ускорения испытания на надёжность, включая проблемы определения констант моделей ускорения испытаний и прогнозирования надёжности по данным ускоренных испытаний. В-третьих, это предложения для совершенствования системы управления качеством микроэлектроники, включая отбраковку ненадёжных компонентов с учётом кинетики дефектообразования в их структурах. По объективным причинам представленный материал исследований не содержит информации о четвёртой прикладной составляющей предмета надёжности, а именно о справочных данных по надёжности микроэлектроники. В получении такого рода новых справочных данных мы видим перспективу продолжения ра-

бот по оценке надёжности современных СБИС и даже в сфере новых разработок субмикронной электронной техники.

В нашу, по её уровню постановочную для данной работы задачу, входит исследование возможности использования критерия ФУ теперь и в сфере оценки надёжности. Мы рассматриваем проблему оценки надёжности многофункциональных СБИС, впервые предлагая учитывать вероятностный по его размерности стационарный критерий – показатель ФУ. Последний статистически определяет вероятность случайного и, по его природе, динамического явления сбоя выходных сигналов тестируемых цифровых микросхем

Необходимость подробного исследования, помимо прочего, определяется актуальностью количественной оценки того вклада, который надёжность СБИС вносит, при всей их высокой безотказности, в формирование надёжности аппаратуры. Для такой оценки предлагается использовать те универсальные данные, по которым исследователь может объективно оценивать показатели надёжности всей многоликкой по её конструкционному исполнению и функциональному назначению ЭКБ. Это данные, которые необходимы для оценки надёжности новых разработок радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). В этом смысле представленный материал является продолжением многолетней «одиссеи» анализа и обеспечения надёжности, но в новых условиях наступившего века цифровой техники, когда каждый образец имеет случайно сформированный показатель ФУ, а после тестирования этот показатель (функция) уже является индивидуальной детерминированной характеристикой данного образца.

Рассмотрим, в чём заключается принципиальная новизна концепции нашего подхода к проблеме оценки надёжности СБИС с учётом безусловной полезности исследований их ФУ в условиях продолжающегося развития сверхвысокоинтегрированной цифровой субмикронной электронной техники.

Главным отличительным признаком этого нового века цифровой техники является тот факт, что в обширной и разносторонней номенклатуре компонентов электронной техники можно отчётливо выделить многофункциональные компоненты видоизменённой по отношению к традиционной ЭКБ формации, а именно СБИС. По всем признакам существующей классификации их принято формально относить к множеству изделий ЭКБ. Но физически, по функциональному назначению или практически в составе РЭА они являются отнюдь не обычными специализированными компонентами, а самостоятельными электронными устройствами сродни платам и даже блокам аппаратуры, со своей схемной архитектурой всей огромной массы микроэлементов. Кроме того, они обладают программными возможностями как внутреннего, так и внешнего, по отношению к внешним схемным агентам или нагрузкам, управления.

Указанное принципиальное различие не должно усложнять ситуацию формального единства ЭКБ, вызывать сомнения в справедливости со всех точек зрения, включая и юридическую, принадлежности СБИС и других перспективных разработок субмикронной электроники к разряду электронных компонентов. Однако, что очень важно, при этом должны открываться возможности исследований, включая исследования надёжности, новоявленных электронных

устройств с учётом их особенностей, исследований по принципиально новой методологии. Поэтому мы предлагаем следующее. Во-первых, считаем, что изменение статуса микросхем (например, СБИС со статуса компонентов на новый статус электронных устройств) при всей объективности таких перемен не найдёт сторонников прежде всего потому, что такое изменение ничего не объясняет, кроме того, что на практике мы имеем дело с новым объектом исследований. Во-вторых, и это главное, хотя мы не отказываемся от принятой классификации и терминологии и признаём за СБИС статус электронного компонента, но считаем, что СБИС обязательно имеет в её составе особую структуру, которой нет в составе всех других компонентов из номенклатуры ЭКБ. Эта структура должна быть, по-нашему мнению, названа отдельно и может носить название «электронный функционал». Определяя ФУ СБИС, мы фактически определяем устойчивость именно «электронного функционала» данной СБИС. Характеристика такого рода устойчивости в самом общем виде определяет качество данного образца. Делается это отвлечённо от множества внешних и внутренних технических характеристик структуры СБИС, но вполне объективно.

Поясним это. В конструкции СБИС всегда имеется и может быть выявлена, по крайней мере одна такая, названная «электронным функционалом», физическая, работающая в реальном масштабе времени схемная структура, которая, по сути, определяет и обеспечивает выходные функциональные возможности данной СБИС. Такие возможности реализуются при условии высокой устойчивости характеристик её «электронного функционала». Понятно, что не исключено наличие в составе одной микросхемы как многофункционального устройства и нескольких «электронных функционалов». Но в любом случае понятие свойства ФУ и понятие «электронного функционала» взаимосвязаны их единой природой. Это следует учитывать при ознакомлении с материалами данной работы, и оно, по мнению автора, требует дальнейшего продолжения этих работ, в частности в сфере разработок документов по нормализации испытаний СБИС.

Понятие «электронный функционал» в виде части конструкции микросхемы имеет двойственный характер. С одной стороны, оно определяется субмикронной структурой микросхем с множеством выходных интерфейсов как материального или физического базиса, определяющего технические характеристики микросхемы. С другой стороны, с учётом схемной архитектуры эти структуры всегда обеспечены и метафизической программной надстройкой, которой не бывает у других объектов номенклатуры ЭКБ. Эта надстройка поддерживает заданный режим и логику функционирования СБИС в реальном масштабе времени, в том числе и при их тестировании.

Для обозначения рассмотренного уникального феномена электронного функционала как обязательной части структуры любой СБИС нами предлагается также ввести более краткий термин «эльф». Обозначение понятия «электронный функционал» (в английском варианте *electronic functional*) упрощённым термином «эльф» будет использовано нами для разработки нового критерия ФУ, по которому определяется величина вероятности сбоя эльфы тестируемого образца СБИС.

При наличии в микросхеме нескольких эльфов для оценки такого рода вероятностного критерия суммируется вероятность сбоя всех эльфов. Понятно и то, что благодаря универсальности вероятностного показателя ФУ СБИС этот показатель и все связанные с ним методические наработки могут использоваться при решении методических вопросов экспериментальной оценки стойкости цифровой субмикронной электроники в условиях заданных внешних воздействий любого вида (например, ионизирующих излучений). Это обстоятельство может заинтересовать заказчиков особо стойкой РЭА. Однако ввиду специфичности такого рода методических разработок при их формальной аналогии мы этой возможности не рассматриваем, сосредоточив внимание на заявленной теме оценки качества и надёжности. При этом предполагается универсальность предложенной разработки в части её более широкого использования.

Указанные выше концептуальные соображения легли в основу материала, изложенного в гл. 1, в которой со ссылкой на известные источники рассмотрены краткий анализ физических основ устойчивости основополагающих структур СБИС в виде МОП-транзисторов и КМОП-инверторов, а также природа дефектов структуры Si – SiO₂. При этом анализируются причины индивидуального характера кинетики изменений уровня ФУ как в период приработки, так и в ходе возможной необратимой деградации во времени параметров МОП-транзисторов, которые определяют основы феномена ФУ СБИС. В гл. 2 представлены экспериментальные данные, подтверждающие перспективы оценки надёжности СБИС по критерию их ФУ. При этом полагаем, что читатель в достаточной степени знаком с вопросами теории и практики оценки надёжности ЭКБ. Поэтому нужные для выполнения нашего анализа положения, существующие в классической методологии оценки надёжности компонентов с учётом статистики их отказов, рассматриваются целенаправленно и путём ссылок на соответствующие работы.

В гл. 3 и 4 исследуются две сущности проявления, своего рода ипостаси, того уровня надёжности СБИС, который может быть выявлен экспериментально, в ходе ресурсных испытаний на надёжность. Во-первых, это методология ускоренной оценки надёжности в условиях форсированных тепловых испытаний и последующих расчётов с использованием термодинамической модели. Во-вторых, это исследования кинетики характеристики ФУ СБИС в ходе длительных, нормированных по режимам испытаний на надёжность с выполнением дальнейшего регрессионного анализа данных для оценки ресурса.

В гл. 3 критически рассматривается сама возможность ускорения тепловых испытаний на надёжность всей ЭКБ, включая наиболее сложный случай оценки надёжности СБИС. Для понимания ситуации в этом последнем случае необходимо рассматривать проблему степени ускорения испытаний в целом, двигаясь от простого к сложному. Поэтому на основе имеющихся экспериментальных данных совместно анализируются лимит достоверности широко известной термодинамической модели старения Аррениуса для оценки интенсивности процессов деградации дискретных компонентов и ничтожность аналогичных воз-

возможностей этой модели для оценки надёжности сверхсложных систем, включая СБИС.

Представленный на эту тему подробный оригинальный материал связан с широко известными наработками классической теории надёжности в направлении моделирования процессов теплового старения и включает многочисленные, в том числе полученные нами, данные испытаний. Анализируются и теоретические предпосылки использования этой модели, и известные экспериментальные данные, полученные исследователями. Главное внимание при этом обращается на критическую оценку возможности использования модели применительно к ускорению процесса теплового старения сверхсложных структур и связанной с этим возможности прогноза ресурса этих структур.

В гл. 4 в качестве возможной альтернативы термодинамической модельной оценки надёжности СБИС мы представляем методологию учёта кинетики критерия ФУ. Такая альтернатива открывается на основе вероятностной количественной оценки ФУ при условии тестирования СБИС до и после нормированных испытаний на надёжность. Хотя вероятность сбоя одного из выходных сигналов тестируемой микросхемы ничтожно мала, она обеспечивает индивидуальную, выявленную экспериментом корреляцию статического по природе вероятностного показателя ФУ с динамическим по природе, также количественным и вероятностным феноменом случайного сбоя СБИС. Для простоты оценки ресурса микросхем по критерию ФУ и наглядности результатов исследований предложена линейная регрессионная модель инженерного расчёта вероятности сбоя микросхемы на заданный момент времени. Таким приёмом мы в нашей методологии прогноза уходим от известного «коварства» природы случайности применительно к проблеме прогнозирования.

Автор просит снисхождения к тем повторениям в изложении материала, которые оказались неизбежными в силу новизны многих рассматриваемых вопросов. В качестве практического результата представленных исследований в Приложениях предложены три инженерные методики, которые являются своего рода бонусами терпеливому читателю, компенсирующими затраченное им на ознакомление с работой время. В этих авторских проектах рекомендуются разработанные подходы к решению задач оценки качества и надёжности СБИС с использованием: сравнительной оценки ФУ, прогноза функционального ресурса, экспериментально-расчётной оценки интенсивности сбоев (отказов) микросхем.

Появлению данной работы в её экспериментальной части способствовали многолетние – с 1971 по 1991 годы – усилия коллектива бывшей лаборатории ВНИИ «Электронстандарт», выполнявшей испытания, в том числе и длительные, стойкости электронных компонентов. Они велись в условиях воздействия физически моделированных факторов космического пространства, включая широкий диапазон температур испытаний. Большую роль в завершении данной работы сыграла организационная поддержка исследований и многочисленных испытаний надёжности СБИС коллективом испытательного центра ОАО «РНИИ «Электронстандарт». Специалистам центра автор выражает свою глу-

бокую признательность. Особую благодарность автор выражает руководителю испытательного центра В. Г. Малинину, без поддержки при проведении необходимых испытаний и большой редакционной работы которого над материалом данная работа не могла бы состояться. Автор благодарит также за ознакомление с материалами исследований и замечания по их содержанию специалистов в области методологии испытаний обширной номенклатуры ЭКБ В.И. Ванина, В. А. Пожилова и Л. Н. Фролова, а за организацию испытаний и исследований СБИС – А. В. Батурина.

Новый подход к оценке надёжности СБИС будет полезен, но вряд ли использован руководителями разработок крупных проектов РЭА, для которых он предназначен, поскольку любая новизна в их деле без всесторонней проверки означает новые риски. Разработанный подход может быть широко востребован научными работниками в области разработок электронной техники, проектировщиками и испытателями, в том числе импортной ЭКБ в условиях внешних воздействий, а также аппаратуры в целом. Он может быть полезен аспирантам и студентам соответствующих специализаций, которым близки проблемы оценки качества и надёжности электронной техники и которых может заинтересовать проблема ликвидации «ножниц» оценки надёжности электроники, включая ускорение испытаний компонентов на надёжность. Он, безусловно, вызовет интерес у широкого круга специалистов по вопросам качества и надёжности в других областях техники.