

САМОСИНХРОНИЗАЦИЯ - ЕСТЕСТВЕННЫЙ ПУТЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОЛГОЖИВУЧЕСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Филин А.В.

1. ФИЗИЧЕСКАЯ ОСНОВА СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

Всего несколько десятилетий отделяет нас от времени, когда техническое творчество в обществе основывалось на принципах *механики*. Основным строительным материалом создававшихся технических механизмов и механических систем служили *металлические материалы* (прежде всего, железо и его сплавы). Теперь же пришло время *информатики* и *информационных компьютерных технологий*, когда основой технического творчества являются *электронные цифровые компьютеры* (далее - компьютеры) в *микросхемотехническом исполнении*. Благодаря постоянным успехам в области технологий производства *интегральных схем* (ИС) - физической элементной базы цифровых компьютеров - они быстро совершенствуются. Считается, что с момента появления кремниевой интегральной технологии производства элементной базы для компьютеров начала отсчет современная компьютерная техника.

В качестве строительного материала ИС всех уровней сложности (ИС-СИС-БИС-СБИС-...) используются полупроводниковые материалы и их окислы - кремний, двуокись кремния, арсенид галлия, фосфид индия, сверхпроводники и др. Но главным строительным материалом для ИС ЭЦК служит *кремний*, точнее - кристаллы кремния, искусственно выращиваемые и специальным образом обрабатываемые. Кремниевые ИС - это элементная база цифровых компьютеров

сегодняшнего дня. Прогнозы показывают, что она сохранит свои позиции и в будущем.

2. НАДЕЖНОСТЬ - ЗОНА ПОСТОЯННОГО ВНИМАНИЯ КОНСТРУКТОРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для всех периодов технического творчества характерен устойчивый интерес к *надежности* (прочности) создаваемых технических систем. Долгое время техника конструирования надежных *механических систем* (МС) опиралась на понятие "запас прочности". Закладываемый в конструкцию МС (ее деталей) запас прочности определял ее надежность (безотказность) и долгоживучесть (долговечность и сохраняемость). Запас прочности для МС - бытовых приборов, автомобилей, планеров самолетов, мостов, трубопроводов и др. - их главная надежность характеристика. Фактически этот параметр косвенно отображает величину *избыточности* (коэффициент запаса прочности), закладываемую в конструкцию (материалы) разрабатываемой МС по отношению к предыдущему варианту.

Компьютер является средством для обработки абстрактной информации. В этом принципиальное отличие компьютера (как *информационной системы*) от МС, которые не оперируют с абстракциями. В ИС (СБИС) используется безыбыточное (двоичное) представление информации и двоичная синхронная схемотехника, чувствительная к задержкам сигналов в проводниках и транзисторах; поэтому в информатике (точнее, в материальной основе информационных систем - их СБИС-элементной базе) не было понятия, аналогичного "запасу прочности" в механике, которое можно было бы применить к оценке надежности и долговечности интегральных информационных систем. Синхронные СБИС и, соответственно, синхронные СБИС-системы не могут работать вплоть до полного

износа (старения) материалов, из которых они сделаны (что имеет место в МС). Главная причина этого - в использовании схмотехники, способной работать лишь при принудительной синхронизации (не привязанной к процессу естественного старения материалов) и не содержащей схемной избыточности - своеобразного аналога коэффициента запаса прочности.

В механические системы «неявно» вводится избыточность с помощью коэффициента запаса прочности, с увеличением которого улучшаются безотказность и долговечность МС, но растут весогабаритные характеристики и стоимость. Для повышения надежности информационных систем, реализуемых на синхронных ИС, приходится прибегать к преднамеренному и явному введению избыточности.

Основные формы избыточности, используемые в синхронных отказоустойчивых системах - дублирование, дублирование со сравнением, мажорирование («два из трех», «три из пяти» и т.д.), учетверение (дублирование пар) аппаратуры на уровне функционально законченных устройств. Время наработки на отказ систем при этом растет, однако сроки их долговечности и сохраняемости остаются прежними - равными ресурсам, срокам службы и сохраняемости ее элементов (ИС). С ростом тактовой частоты ИС, сопровождающейся уменьшением геометрических размеров ее компонентов, параметры долгоживучести субмикронных ИС имеют тенденцию к уменьшению.

3. ВЗАИМОСВЯЗЬ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОЖИВУЧЕСТИ

Согласно терминологии, принятой в нашей стране, *долговечность* и *сохраняемость* технических изделий (в том числе и микроэлектронных приборов - ИС) вместе с *безотказностью* и *ремонтпригодностью* определяют их более общее свойство -

надежность [1, 2]. Далее в случаях, когда имеются в виду оба понятия - долговечность и сохраняемость - одновременно, используется (для краткости) обобщающий термин "*долгоживучесть*".

Долговечность и сохраняемость являются составными частями надежности, поскольку оба эти свойства влияют на значения показателей безопасности, безотказности и ремонтпригодности технических изделий (ТИ) длительно, вплоть до предельной наработки (предельного календарного срока эксплуатации), в течение и после хранения и транспортирования. Хотя показатели долговечности и сохраняемости не входят непосредственно в формулу для вероятности надежной работы, значения их показывают, в течение какого периода эксплуатации и хранения обеспечивается заданная надежность изделия. Ограничение длительности эксплуатации и хранения связано с затратами на восстановительный ремонт и организацию хранения. Поэтому показатели *долгоживучести* изделия определяют временные границы его *экономически целесообразной* эксплуатации и хранения.

4. СМЫСЛ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОЖИВУЧЕСТИ

4.1. Долговечность

Свойство любой системы, характеризующее ее предельно возможное время жизни (ПВЖ), принято называть *долговечностью*. Долговечность изделия является двухпараметрическим свойством и выражается двумя типами количественных показателей - *ресурсами* и *сроками службы*.

Ресурсы (до первого ремонта - t_1 , межремонтный ресурс - $t_{м.р.}$, полный ресурс - t_n) отражают способность технического изделия в процессе длительного функционирования нормально воспринимать эксплуатационные нагрузки, и предельное состояние его при этом определяется *износом* и *усталостной повреждаемостью*;

соответствующие сроки службы (T_1 , $T_{м.р.}$, T_n) выражают свойство конструкции *не стареть*.

Максимальная продолжительность эксплуатации ТИ определяется назначенным для них *полным (предельным) ресурсом* (ПР) или *полным (предельным) сроком службы* (ПСС), измеряемым для большинства изделий числом часов работы. ПР и ПСС назначаются также и для отдельных частей (агрегатов, подсистем и других съемных изделий).

Разработка конструкции механических или электронных систем ведется всегда на достижение предельных значений ресурса и срока службы. ПР и ПСС сменяемых частей в идеале должны быть не меньше соответствующих показателей для ТИ как системы в целом. Однако выполнить это требование на практике очень сложно. Поэтому отказавшие и износившиеся части систем, имеющие меньшие значения ПР и ПСС, подлежат замене. В этих случаях приходится предусматривать ЗИП.

Повышение ресурса и срока службы имеет большое значение, позволяя уменьшить количество заказываемых компонентов и систем. При этом их экономические показатели улучшаются.

4.2. Сохраняемость

По мере повышения функциональной значимости изделий (например, ИС - СИС - БИС - СБИС и т.д.) и, соответственно, цен на них возросло значение *сохраняемости* - свойства ТИ сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтпригодности в течение и после хранения и транспортирования. Сохраняемость измеряется *сроком сохраняемости* T_c , который определяется как календарное время хранения изделия в специально оговоренных условиях, в течение которого сохраняются его

эксплуатационные свойства [2]. При небольшом числе эксплуатирующихся спецсистем и при длительном сроке их службы оказывается экономически рациональным производство за короткий период всей партии спецсистем с последующим хранением (т.е. их консервированием) значительной их части. По мере необходимости производится их расконсервация и введение в строй. При этом очевидна необходимость удлинения срока сохраняемости СБИС.

5. ОГРАНИЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОЖИВУЧЕСТИ ИС СО СТОРОНЫ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Интегральная схема создается на основе слоев из проводящих материалов, наносимых на пластину, обычно кремниевую. Различные сочетания материалов и методов их нанесения лежат в основе различных технологий ИС. Наиболее распространены в настоящее время технологии n-МДП и КМДП. ИС имеет многослойную структуру. В слоях располагаются элементы схемы транзисторов, межтранзисторные и межслойные связи (проводники) и прочие «микродетали». Слои располагаются иерархически на кремниевой подложке, которая упаковывается в герметичный корпус с выводами. В силу этого все компоненты ИС работают в одинаковых условиях и, следовательно, стареют примерно с одинаковой скоростью. ИС являются неремонтируемыми изделиями, и потому естественная тенденция здесь - сделать СБИС саморемонтирующимися, то есть отказоустойчивыми.

Можно обобщить все слои ИС в один, назвав его *топологическим слоем*.

ПВЖ топологического слоя ИС значительно меньше ПВЖ материалов, из которых сделана сама микросхема, и ПВЖ ее макродеталей (корпуса, подложки, выводов). Причина этого - в

микроразмерах элементов слоя и во временной зависимости качества функционирования логики интегральной *синхронной* ИС от процесса старения материалов, проявляющегося в прогрессирующем изменении ее временных параметров даже при постоянной температуре. Следствие - нарушение процессов синхронизации сигналов и прогрессирующее снижение надежности работы (рост числа сбоев) ИС и системы в целом. Поскольку может оказаться, что ИС не в состоянии надежно работать дальше, хотя физически она цела, приходится ввести еще один показатель - *действительное время жизни* (ДВЖ), более известное как *срок службы* прибора. Этот срок назначается, исходя из практики эксплуатации множества приборов. Поскольку электронные системы уступают по этому параметру механическим системам и объектам, которыми они управляют, то чрезвычайно актуальным является увеличение срока их службы - с ДВЖ ИС хотя бы до ПВЖ материалов, применяемых в ИС. Венцом усилий в случае решения такой задачи может быть значительный экономический эффект от уменьшения числа замен компьютерных систем управления на интервале существования основного технологического оборудования объекта управления.

Высокие значения показателей сохраняемости важны для заменяемых изделий, в роли которых могут оказаться и СБИС. Это может быть проиллюстрировано на примере фактических значений показателей долговечности современных самолетов - носителей электронных систем на основе микропроцессорных СБИС. Полный срок службы пассажирского самолета Боинг-747 составляет 30 лет, а его электронных систем на микропроцессорах (число которых достигает 800) не превышает 10 лет. При таком соотношении приходится неоднократно повторять дорогостоящую операцию замены микроэлектронного оборудования самолета.

6. СПОСОБ ПРОДЛЕНИЯ ДОЛГОЖИВУЧЕСТИ ИС

Срок службы (ДВЖ) любой современной технической системы зависит от многих факторов - технического ресурса, особенностей работы или использования объекта управления, возможностей проведения восстановительных работ, модернизации и т.д. Он может быть продлен проведением капитального ремонта либо модернизации. Для СБИС основным способом продления их жизни можно считать только *повышение ресурса*. Модернизация и капитальный ремонт для них использованы быть не могут (они выполняются как неремонтоспособные приборы).

Особенно важна задача продления ДВЖ (ресурса и срока службы) СБИС-систем для промышленных и военных управляющих и информационных систем, устанавливаемых на кораблях, самолетах, космических и других объектах, которые своими агрессивными условиями эксплуатации способствуют быстрому старению микротопологического слоя ИС. Решение этой задачи обеспечивает переход в СБИС и более крупных схемах на СС-схемотехнику, нечувствительную к процессам старения материалов микротопологического слоя и способную правильно работать вплоть до начала его разрушения (то есть до разрушения структуры транзисторов). При этом сроки службы и сохраняемости ИС могут быть увеличены в несколько раз. Экономическая выгода от продления показателей долгоживучести может служить обоснованием затрат, которые пойдут на организацию и внедрение новой технологии проектирования самосинхронных ИС.

7. СС-СХЕМОТЕХНИКА - ЭФФЕКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ НАДЁЖНОСТИ ИС

Альгирдас Авижиенис (разработчик первого отказоустойчивого компьютера и патриарх этого направления в компьютерной технике) и Жан-Клод Лапри в одной из своих работ [3] обратили внимание на противоречие, имеющее место в полупроводниковых ИС - интегральной элементной базе компьютеров. Суть его сводилась к тому, что в ИС и системах, на них построенных, вообще отсутствует какой-либо «запас прочности», свойственный механическим системам, и долговечность (срок службы) ИС не совпадает с предельно возможным временем жизни материалов, из которых она создана.

Сегодня можно сказать, что путь устранения данного противоречия найден: это отказ от принудительной синхронизации процессов в ИС и переход на естественную событийную синхронизацию (самосинхронизацию), идеей которой является введение двоичной избыточной (самосинхронной) логики вместо двоичной безыбыточной. При этом ИС приобретают целый набор уникальных свойств, в том числе нечувствительность к процессам старения (обычно вызывающим параметрические отказы в аппаратуре синхронной ИС) и, как следствие, способность функционировать вплоть до разрушения топологических слоев ИС (что эквивалентно наступлению усталостного износа в механических системах) [4, 5].

Хотя самосинхронную технологию проектирования ИС можно использовать уже сегодня, ее час, скорее всего, пробьет, когда ИС достигнут ГИС- и ВИС-уровней интеграции, и будут использоваться нетрадиционные архитектуры с программным и аппаратным параллелизмом, основанным на общем принципе, на роль которого идеально подходит принцип самосинхронного взаимодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Волков Л.И., Шишкевич А.М.* Надежность летательных аппаратов. М.: Высшая школа, 1975, -296 с.
2. *Анцелович Л.А.* Конспект лекций по курсу «Надежность самолета». М.Редиздат МАИ, 1971, -106 с.
3. *A. Avizienis and J.C.Laprie.* Dependable Computing: From Concepts to Design Diversity. // Proc. IEEE, vol. 74, No 5, May 1986, pp. 629-638.
4. *Филин А.В., Степченков Ю.А.* Схемотехника интегральной элементной базы естественно-надежных компьютеров. // Системы и средства информатики. Вып. 7. -М.: Наука, Физматлит, 1995, - с. 222-239.
5. *Филин А.В., Степченков Ю.А.* Компьютеры без синхронизации. // Наст. сб.