

Качество и надежность полупроводниковых изделий

На предприятиях электронной промышленности часто можно услышать следующие фразы: «необходимо повысить качество и надежность выпускаемых полупроводниковых изделий»; «качество выпускаемых нами изделий, как показала их эксплуатация в радиоаппаратуре, повысилось (или снизилось)»; «надежность выпускаемых нами изделий типа А (или серии Б) на входном контроле за истекший период повысилась (или понизилась)». Авторы считают, что в приведенных двух последних фразах смешаны понятия качества и надежности полупроводниковых изделий.

**Митрофан Горлов,
д. т. н.
Андрей Строгонов,
к. т. н.**

andreis@hotmail.ru

Дмитрий Ануфриев

Качество изделий

Еще в 1968 году было известно более ста различных толкований понятия «качество продукции». В настоящее время наиболее распространена теория относительного качества, суть которой состоит в том, что качество изделий определяется его целевым назначением.

По ГОСТ 15467-79 («Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения») под качеством продукции (в нашем случае изделий) понимается совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенным требованиям в соответствии с назначением.

Для изготовителя полупроводниковых изделий (ППИ) — диодов, транзисторов, ИС — это понятие связано с соответствием выпускаемых изделий требованиям документации по электрическим параметрам и внешнему виду, принятием техническим контролем партии изделий с первого или второго предъявления, отсутствием или величиной претензий потребителей к данному типу изделий с входного контроля

или из сферы изготовления электронных блоков и радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) (рис. 1).

Потребители ППИ оценивают качество получаемых изделий по количеству отказов по электрическим параметрам и внешнему виду на входном контроле при нормальных условиях, повышенных или пониженных температурах, в различных отбраковочных испытаниях.

По количеству отказов ППИ при изготовлении плат, блоков, РЭА также судят об их качестве.

Для изготовителей ППИ важнейшим показателем качества служит процент выхода годных. Это объясняется тем, что выход годных изделий определяет в комплексе управляемость и стабильность производства.

Понятие о качестве составляется из точек зрения предприятия-изготовителя и предприятия-потребителя на основании понятий, бытующих в общественном мнении представлений о перспективах развития и использования изделий. Оно может содержать и истинные и ложные, и эмоциональные и рациональные составляющие. Ежедневно в обычных разговорах речь идет о качестве определенного изделия, и связывается это понятие с некоторыми принципиальными и индивидуальными характеристиками изделия. Качество может быть признано вполне соответствующим назначению изделия, приемлемым или неприемлемым, делающим изделия надежными при использовании в определенных целях, либо недостаточно надежными, либо ненадежными.

С позиций общественного мнения качество — это обеспечение потребностей, пожеланий потребителей. Изделие лучшего качества должно больше удовлетворять запросам потребителей, больше нравиться им, несколько превосходить их пожелания. «Высшее качество», «качество на повышенном уровне» — это показатели качества, нередко оцениваемые не столько количественными критериями, сколько эмоциональными, неколичественными.

С другой стороны, предприятиями — изготовителями изделий под качеством часто понимается точное следование техническому заданию. Например,

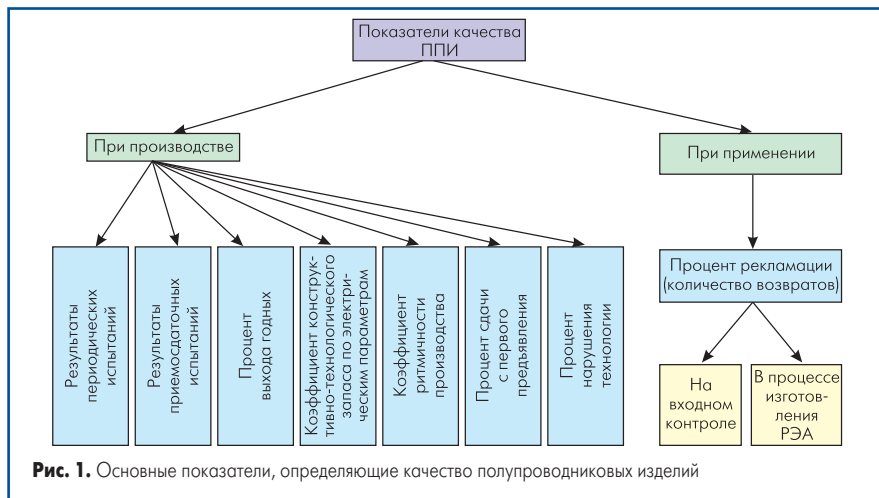


Рис. 1. Основные показатели, определяющие качество полупроводниковых изделий

если интегральные схемы (ИС) выполняют в полной мере все требования технического задания, значит, конструктор качественно разработал ИС, она полностью удовлетворяет требованиям. Если во время производства приходится выполнять много коррекций электрической схемы, конструкции, значит, ИС разработана некачественно.

При производстве хорошо разработанное изделие может быть изготовлено, не должным образом либо из некачественных материалов, некачественным инструментом. Брак может быть обнаружено производственной системой контроля качества либо не обнаружено, либо обнаружено, но пропущено ею.

Как видим, понятие качества в достаточной степени неопределенно, оно может рассматриваться с разных позиций, с учетом различных перспектив. С некоторых точек зрения качество всегда будет недостаточным, всегда могут быть сделаны замечания о необходимости его совершенствования. Если качество не определено четкими, точными критериями, если оно определяется эмоциональным восприятием человека отдельных характеристик изделий, оценки качества всегда будут приближенными. Критерии качества должны определяться количественно. Они должны исходить из предельных, но реальных возможностей производства, исходных материалов, конструкций. Только при таких количественных определениях возможно сопоставление качества и установленные перспективы его повышения.

Требования к качеству ИС постоянно повышаются в связи с непрерывным ростом их степени интеграции и функциональной сложности, а также с расширением их производства. На этапе разработки качество конструкции ИС определяется ее технологичностью. Показатели качества по технологичности обычно связывают с процентом выхода годных ИС. Основная сложность при этом заключается в том, что процент выхода годных ИС является интегральной характеристикой качества, определяющей этапы и разработки, и производства. Применяя процент выхода годных ИС непосредственно для оценки технологичности конструкции, можно существенно ошибиться, так как на его величину непосредственно влияет множество факторов, связанных с производством.

В то же время есть прямая связь процента выхода годных с процентом рекламаций. Например, при выпуске ИС серии 106 повышенной надежности повышался общий выход годных ИС по финишному участку и снижалось количество ИС, рекламированных со входного контроля предприятий — изготовителей РЭА (табл. 1).

Заметим, что с повышением среднего значения процента выхода годных ИС уменьшался его разброс, а также количество рекламированных схем.

Требования к качеству могут быть выполнены, перевыполнены либо недовыполнены. Недовыполнение требований к качеству ведет к потерям, к понижению удовлетворенности потребителей продукцией, оно должно быть

Таблица 1

Год выпуска	Процент выхода годных ИС		Процент рекламированных ИС
	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение	
1-й	45,98	2,96	0,008
4-й	86,6	2,35	0,0036
8-й	97,1	1,85	0,0021

предупреждено, его нельзя допускать. Вместе с тем, если перевыполнение требований по качеству ведет к избыточным затратам в производстве, его также не следует допускать, во всяком случае, когда это ведет к избыточным потерям. Данные о качестве являются важнейшим исходным материалом для конструкторов и технологов. Анализируя эти данные, они могут совершенствовать конструкцию, технологический процесс, то есть повышать качество этих изделий.

Показатели качества ППИ

В рамках работ по повышению качества большинством изготовителей полупроводниковых изделий во всем мире с начала 1982 года для измерения уровня качества продукции стали использовать такой показатель качества, как количество дефектных изделий на один миллион, оцениваемых статистически из всего количества изготавливаемых изделий данного типа. Например, в Японии качество ППИ должно удовлетворять следующим требованиям: для полупроводниковых изделий количество дефектных на один миллион полученных не должно превышать 10, для интегральных схем малой и средней степени интеграции — 100, для больших ИС — 1000.

Для ППИ качество можно рассматривать как функцию процесса производства изделий независимо от времени. Процесс изготовления ППИ обычно сопровождается измерениями на разных этапах, используемыми для оценки обеспечения требуемого качества по операциям производственного процесса. Таким образом, качество связывается только с процессом производства изделий, но не с временем производства.

При оценке ППИ используются понятия, характеризующие запасы по тому или иному электрическому параметру по отношению к нормам технических условий. Запасы по параметрам определяются конструктивными данными и особенностями технологии производства, поэтому используют понятие конструктивно-технологического запаса.

Оценивать запасы по электрическим параметрам в виде размерных величин неудобно, так как в этом случае сравнение запасов по различным параметрам становится весьма затруднительным. Поэтому конструктивно-технологический запас K определяют как безразмерную величину. При отсутствии информации о законе распределения параметров предельные значения X_H , X_B (нижнее и верхнее значения норм параметров) можно определять экспериментально на основе большой выборки. Выражения для коэффициента запаса для верхнего и нижнего значений норм будут иметь вид:

$$K_B = \frac{X_{B,ту} - X_B}{X_B - \bar{X}} \times 100\%;$$

$$K_H = \frac{X_H - X_{H,ту}}{\bar{X} - X_H} \times 100\%,$$

где $X_{H,ту}$ и $X_{B,ту}$ — нижнее и верхнее значения норм, оговоренных в технических условиях; \bar{X} — среднее значение параметра в выборке.

Очевидно, что величина абсолютного значения производственного запаса по параметрам ($X_{B,ту} - X_B$) или ($X_H - X_{H,ту}$) должна быть не менее одной наибольшей погрешности измерений (контроля). При выполнении этого условия поставляемые ИС, даже при наличии вышеупомянутых погрешностей контроля, будут иметь значения параметров не ниже норм, установленных в технических условиях. Если производственный запас будет меньше погрешности измерений, то в этом случае могут браковаться даже ИС, имеющие параметры, соответствующие требованиям технических условий.

Результаты оценки запасов необходимо учитывать при установлении системы контроля параметров в технологической документации и технических условиях. При отсутствии запасов по какому-либо параметру возникает необходимость обязательной проверки данного параметра хотя бы на одной стадии технологического контроля.

Показатель «ритмичность выпуска товарной продукции» (далее «ритмичность выпуска изделий») характеризует в определенной степени и качество выпускаемых изделий. Общеизвестно, что при плохой организации производства качество выпускаемых изделий, как правило, снижается. При этом повышается процент брака при проверке изделий в ОТК и увеличивается уровень возврата изделий от потребителей. Как показали наблюдения, количество дефектов (нарушений технологического процесса) при неритмичной работе в конце месяца может возрасти в 3–5 раз по сравнению со средним значением.

Во многих фирмах США высшее руководство проповедует качество, вывешивает лозунги и всячески стимулирует борьбу за качество в течение первых 12 недель каждого квартала. Однако под давлением необходимости своевременного выполнения квартальных поставок или получения запланированной прибыли в последнюю тринадцатую неделю все может измениться.

Непосредственное влияние на качество выпускаемых партий изделий оказывают результаты периодических испытаний, результаты приемо-сдаточных испытаний, процент сдачи с первого предъявления, процент нарушений технологий при изготовлении изделий. Все эти показатели, определяющие качество, являются основными при оценке уровня производства изделий, при оценке деловых качеств в первую очередь мастера, технолога.

При выпуске однотипных ППИ различными заводами показатели, определяющие качество изделий, определяют и сравнительный уровень всего производства, его организационно-технический уровень.

**Надежность изделий**

Если качество полупроводниковых изделий практически оценивается данными по выходному (у изготовителя) и входному (у потребителя) контролю на соответствие требованиям технических условий (ТУ) по электрическим параметрам и внешнему виду, то надежность ППИ связана с временем сохранения своих параметров в условиях эксплуатации, включая и длительное хранение.

Поэтому надежность ППИ — это его внутреннее свойство сохранять свои характеристики (значения параметров) в заданных пределах и в заданных условиях эксплуатации.

Используя указанные определения качества и надежности, можно оценивать качество и надежность ППИ отдельно и независимо. Одна оценка — качество — характеризует эффективность производственного процесса, другая — надежность — является характеристикой свойств ППИ во времени. Можно считать, что оба эти свойства зависимы, то есть качество определяет надежность или надежность определяет качество, но оба эти свойства и их оценки независимы.

Надежность ППИ характеризуется следующими показателями, как правило, записываемыми через конкретные величины в ТУ: сроком службы или долговечностью, сохраняемостью или гамма-процентным сроком сохраняемости; интенсивностью отказов.

Поэтому можно утверждать, что надежность изделия — более объективное понятие.

Если перед нами лежат две ИС одного типа, номинала, то, замерив электрические параметры этих схем, можно сказать, какая из них более качественная. Это относится и к любым другим изделиям. Но заранее мы не можем сказать, какая из этих схем будет более надежной. Как правило, характеристики надежности, зависящие от времени и режимов эксплуатации, носят вероятностный характер. Имея конкретный показатель надежности в технических условиях, например интенсивность отказов, мы можем сказать с определенной вероятностью, что выпускаемая партия ИС имеет данный показатель надежности, но конкретно для каждой схемы из этой партии мы не можем назвать характеристику надежности. Например, какая ИС через какое время эксплуатации откажет, то есть выйдет из строя, мы априорно не можем определить.

Отказы ППИ могут быть катастрофическими (чаще всего это случайные отказы) и постепенными, связанными с деградацией параметров при внешнем воздействии, поэтому они иногда называются деградационными.

Имеющийся статистический материал по эксплуатации ППИ показывает, что доля катастрофических отказов в общем объеме отказов достаточно велика. Под внезапным, или катастрофическим, отказом понимается отказ, возникающий в результате скачкообразного изменения одного или нескольких значений основных параметров и выхода их за нормы ТУ.

Деление на внезапные и постепенные отказы по электрическим параметрам является

в некоторой степени условным и отражает наши знания о физической природе процессов, происходящих в изделиях при их эксплуатации, о влиянии на них условий производства, применяемых материалов, методики измерений электрических параметров, изменяющихся в процессе эксплуатации.

Основное отличие внезапных отказов от постепенных заключается в том, что выход из строя при внезапных отказах не может быть прогнозируемым (для ППИ, можно сказать, трудно прогнозируемым), и в этом случае любые методы обычного контроля бесполезны, в то время как в случае постепенных отказов возможно включение в рабочий комплект измерительной аппаратуры так называемого встроенного контроля, позволяющего прогнозировать выход аппаратуры из строя по вине ППИ и проводить соответствующие мероприятия.

К катастрофическим отказам относятся отказы ИС, в которых по крайней мере одна из заданных тестовых комбинаций на входах не вызывает требуемого отклика на выходах. Для параметрических отказов характерно то, что реализуется вся полнота требуемых откликов на выходах, однако величины измеряемых параметров не попадают в диапазон установленных норм.

В серийном производстве ИС катастрофические отказы вызваны дефектностью производственного процесса, недостаточным качеством применяемых материалов, шаблонов, энергоносителей, состоянием электровакуумной гигиены, уровнем культуры производства и т. п., а параметрические отказы в большинстве случаев — отклонениями режимов технологических операций и их разброса.

Параметрические отказы, сохраняя функциональную исправность ИС, изменяют их быстродействие, потребление мощности и другие важные характеристики, без которых схемы не нужны потребителю. Эти дефекты часто бывают связаны со значительными нарушениями производственных процессов и обычно касаются больших количеств схем на пластинах, значительного количества пластин, партий ИС. Катастрофические отказы обычно бывают связаны с локальными дефектами материалов, с включениями посторонних частиц в пластины или кристаллы, с неидеальностью производственного оборудования, с упущениями производственного персонала, поэтому их легче обнаружить.

Так как надежность любого изделия закладывается при его конструировании, а обеспечивается при его изготовлении, то надежность изготовленного изделия не может быть выше надежности, заложенной при конструировании. Это, на наш взгляд, может быть справедливо для механических изделий, но ни в коем случае не для полупроводниковых, в том числе, конечно, и самых сложных ИС.

Общую надежность изделий, например вероятность безотказной работы, можно рассматривать как сочетание двух видов надежности: надежности, определяемой катастрофическими отказами $P(\lambda)$, и надежности,

определяемой постепенным ухудшением его рабочих характеристик со временем $P(t)$:

$$P = P(\lambda) \times P(t).$$

Влияние технологических процессов на надежность ППИ исследовано недостаточно. Встречающееся мнение о том, что надежные изделия можно изготавливать на ненадежном (устаревшем) технологическом оборудовании, практически не подтверждается. Из-за экономических соображений нередко используют устаревшие технологические процессы, ошибочно считая, что контроль и испытания позволят получить готовые изделия требуемого качества и надежности.

Предположим, что надежность ИС после его изготовления P равна надежности схемы, заложенной при конструировании P_0 . При этом всякое отклонение в технологическом процессе, в материалах, допусках, чаще всего встречающееся в начале серийного производства, снижает надежность получаемой ИС на величину ΔP .

Но если в процессе серийного изготовления было внедрено новое конструктивно-технологическое решение, направленное на повышение качества и надежности изделия, проведена замена оборудования на новое с меньшими допусками или внедрена автоматизация технологического процесса и т. п., то надежность выпускаемых изделий может быть повышена на величину ΔP относительно величины P_0 . Тогда в общем случае для серийно выпускаемых ИС величина надежности P равна:

$$P = P_0 \mp \Delta P.$$

Данное положение является основой для работы над повышением надежности ИС в процессе их серийного производства.

Например, при начале производства БИС обычно выход годных и надежность схем оказываются относительно небольшими, но они заметно повышаются при совершенствовании конструкции, устранении «слабых мест» конструкции, производственных процессов, выявленных при серийном производстве, и их стабилизации.

Задача производственников всеми возможными методами уменьшить время достижения надежности, заложенной при конструировании. Обычно требуется один — два года для того, чтобы довести производство ИС до уровня высоконадежного (рис. 2).

Другая концепция исходит из того, что высокая надежность закладывается в изделие при разработке его конструкции и технологии с учетом того, чтобы в производстве никаких дальнейших доработок конструкции и технологии не проводилось. Необходимо только неукоснительно соблюдать неизменность конструкции изделия и не нарушать заложенных разработчиком требований к производству и выполнению технологического процесса. Высокая надежность изделия в этом случае обеспечивается не просто путем оценки и подтверждения надежности готовых изделий, а всей совокупностью мер, предпринятых раз-

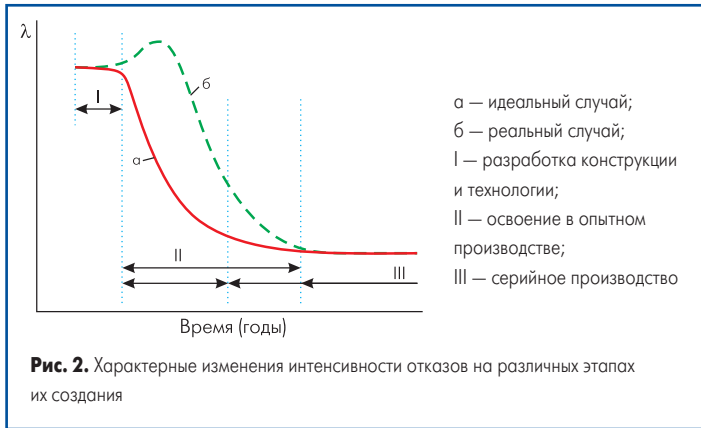


Рис. 2. Характерные изменения интенсивности отказов на различных этапах их создания

Таблица 2

Тип ИС и ее конструктивно-технологические особенности	Расчетные значения λ для $T_{OKP} = 35^\circ C; 10^4$ 1/ч	
	MIL-HDBK-217	РД 11.0755-90
КР 1054ГП1 Генератор тестовых сигналов, аналоговая ИС по биполярной технологии в пластмассовом корпусе 2101.8-1, число транзисторов 144	7,5	0,32
КР 1830BE51 Однокристалльная цифровая микро-ЭВМ, по КМОП-технологии в пластмассовом корпусе 2123.40-1, число вентилях 2000	9,47	1,5

работчиком изделия и технологического процесса и мер, предпринимаемых производственным и контролирующим персоналом по обеспечению соблюдения требований технологической документации.

Для ППИ принято в отечественной практике считать по значениям интенсивности отказов λ , что:

- невысокая надежность — при $\lambda > 10^{-4}$ при 1/ч;
- средняя надежность — при $10^{-6} < \lambda \leq 10^{-4}$ 1/ч;
- высокая надежность — при $10^{-9} < \lambda \leq 10^{-6}$ 1/ч;
- сверхвысокая надежность — при $\lambda \leq 10^{-9}$ 1/ч.

Расчет надежности ИС

На практике часто требуется знать надежность (интенсивность отказов) не только серийно выпускаемых, но и вновь разрабатываемых ИС. Провести испытания на надежность в этом случае невозможно. Необходимость исследования и анализа перспективных ИС привела к разработке методов прогнозирования интенсивностей отказов новых схем самого различного функционального назначения.

В основу многих теоретических моделей положены предположения о том, что распределение вероятности безотказной работы описывается экспоненциальным законом, а механизмы отказов, вызываемые термическими, механическими и другими нагрузками, стохастически независимы, то есть интенсивности отказов вследствие этих причин могут складываться.

Расчет надежности по методу оценки сложности ИС и влияния воздействующих факторов приведен в американском справочнике MIL-HDBK-217.

В основу всех моделей для расчета монолитных ИС положено понятие $\lambda_T + \lambda_M$ аддитивной модели, то есть $\lambda = \lambda_T + \lambda_M$. Здесь λ — общая интенсивность отказов для монолитных схем.

λ_T — составляющая интенсивности отказов, обусловленная деградацией парамет-

ров во времени. Эта деградация определяется механизмами, которые ускоряются температурой и электрической нагрузкой; λ_T определяется главным образом явлениями, которые подчиняются зависимости типа Аррениуса;

λ_M — составляющая интенсивности отказов из-за механических причин (внешнее воздействие среды) и представляющая механизмы отказа, обусловленные непосредственными или косвенными механическими нагрузками (например, нагрузками, вызванными тепловым расширением).

На рис. 3 показана структурная схема для оценки интенсивности отказов, по которой рекомендуется делать расчет λ .

Формулы для расчета интенсивности отказов зависят от типа ИС и их сложности. Так, интенсивность отказов для монолитных биполярных и МОП цифровых ИС малого и среднего уровня интеграции (менее 100 вентилях) вычисляется по формуле:

$$\lambda = P_Q P_L [C_1 P_{T1} + C_2 P_E] P_P,$$

где P_Q — коэффициент, зависящий от подготовки и качества процесса производства; P_L — коэффициент, зависящий от отработанности технологического процесса; C_1 и C_2 — коэффициенты сложности для ИС малого и среднего уровня интеграции; P_{T1} — коэффициент, зависящий от температуры кристалла и технологии; P_E — коэффициент жесткости условий эксплуатации; P_P — коэффициент, учитывающий количество выводов.

Для биполярных и МОП аналоговых ИС:

$$\lambda = P_Q P_L [C_1 P_{T2} + C_2 P_E],$$

где P_{T2} — коэффициент, зависящий от температуры кристалла и технологии.

Для биполярных и МОП цифровых ИС высокого уровня интеграции (содержащих 100 и более вентилях):

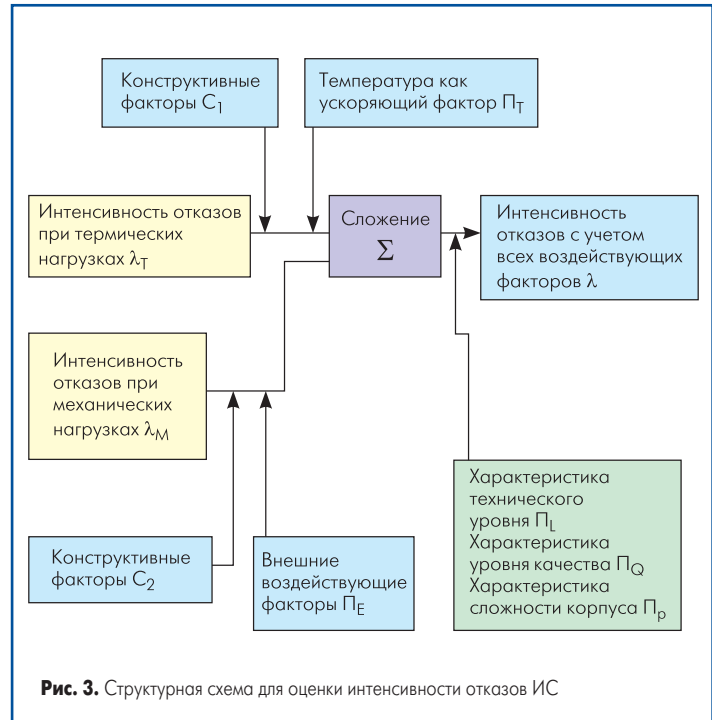


Рис. 3. Структурная схема для оценки интенсивности отказов ИС

$$\lambda = P_Q P_L [C_1 P_{T1} + C_2 P_E] P_P,$$

где C_1 и C_2 — коэффициенты сложности для ИС с высоким уровнем интеграции.

Для МОП и биполярных ИС запоминающих устройств:

$$\lambda = P_Q P_L [C_1 P_{T1} + C_2 P_E] P_P,$$

где C_1 и C_2 — коэффициенты сложности ИС, зависящие от числа битов.

В справочнике приведены соответствующие таблицы и формулы для расчета коэффициентов, указанных в формулах.

В отечественной практике расчетный метод прогнозирования надежности приведен в руководящем документе РД 11.0755-90. Общая модель надежности разрабатываемой ИС имеет вид:

$$\lambda = K_{II} (\lambda_{кз} + \lambda_{эк} + \lambda_{мс} + \lambda_{пр}),$$

где K_{II} — коэффициент вида приемки, характеризующий систему отбраковочных испытаний; $\lambda_{кз}$ — интенсивность отказов конструктивных элементов (корпус, установка кристалла в корпус, сварных внутренних соединений); $\lambda_{эк}$ — интенсивность отказов элементов кристалла; $\lambda_{мс}$ — интенсивность отказов межэлементных соединений; $\lambda_{пр}$ — интенсивность отказов прочих элементов кристалла. Интенсивности отказов $\lambda_{кз}$, $\lambda_{эк}$, $\lambda_{мс}$, $\lambda_{пр}$ рассчитываются по соответствующим формулам, приведенным в документе.

Интересно оценить интенсивность отказов, рассчитанную по этим двум документам (табл. 2).

Из таблицы 2 видно, что расчетные значения интенсивностей отказов для указанных ИС более точны по РД 11.0755-90, так как ближе к полученным экспериментально и указанным в ТУ значениям, равным 10^{-6} 1/ч.