

15. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ

Качество продукции является важнейшей составляющей коммерческого успеха и исключительно значимым фактором в конкурентной борьбе. Высокое качество компонентов Infineon обусловлено требованиями, которые пользователи предъявляют к экономической эффективности процесса производства и, конечно, высокой надёжности — особенно в тех случаях, когда компоненты Infineon используются в приложениях, связанных с обеспечением безопасности или чувствительных к условиям окружающей среды.

Параметры качества обычно стараются привести в соответствие с требованиями стандарта DIN 55350, который гласит, что «качество есть совокупность свойств и характеристик продукта или услуги, которые связаны с его способностью удовлетворять заданным требованиям». Таким образом, качество — это мера, в которой продукция или услуги «оправдывают» своё назначение. С точки зрения пользователя, качество продукции определяется эффективностью её применения в условиях, которые соответствуют заданным нормам.

15.1. Критерии, определяющие качество продукции

Качество продукции представляет собой совокупность различных элементов (критериев). Наиболее важными из них являются:

- Свойства и характеристики продукции, в том числе её функциональные характеристики и значения параметров, указываемые в спецификации и технических описаниях.
- Технологичность: данный критерий определяет, насколько стабильным и отлаженным является процесс производства продукции.
- Количество отбракованных (вследствие электрических и/или механических дефектов) полупроводниковых компонентов в партии изделий. Дефектом считается любое несоответствие характеристикам, заявленным в спецификации.
- Качество поставки продукции, например соблюдение сроков поставки.

- Пригодность к применению в пользовательских устройствах (обеспечивается ли качество сборки печатной платы и особенно процессов пайки и очистки).
- Надёжность, т.е. стабильность характеристик полупроводникового компонента при работе в устройстве, с учётом возможной деградации этих характеристик, способной ухудшить функциональные возможности компонента.

Контроль качества как основа для оптимизации качества продукции

Качество продукции и услуг, оптимальное как с точки зрения производителя, так и с точки зрения пользователя, не может быть достигнуто случайным образом. Исходя из опыта работы компании Infineon, оптимальность качества продукции — это результат совершенного управления бизнес-процессами внутри компании, которое реализовано в рамках программы Business Excellence («Совершенство бизнеса»).

Infineon рассматривает управление качеством как взаимно скоординированную деятельность управляющего персонала и каждого работника компании, направленную на достижение главной цели — совершенства бизнеса. Таким образом, политика компании Infineon в области качества включает в себя упреждающее планирование, поддержку концепции непрерывных улучшений (СІР), предварительный контроль качества и итоговый контроль качества с целью обнаружения и анализа отдельных неисправностей продукции. Фундаментальная концепция современной теории управления качеством продукции как основа для совершенствования бизнеса была впервые разработана в 1970-е годы. Она исходит из очевидного факта, что одними только мерами контроля в классическом их понимании (выходной контроль качества) невозможно обеспечить безупречное качество продукции во всём диапазоне целей и задач. В настоящее время эта точка зрения стала общепринятой.

Основными причинами потерь в качестве продукции являются ошибки при проектировании и недостаточно эффективный

контроль на этапе производства продукции. Исходя из этого, в концепции управления качеством основной упор делается на оптимальное планирование мер по обеспечению качества продукции и практическую реализацию этих мер.

Всё это привело к появлению в 1980-е годы новой перспективной концепции тотального управления качеством (Total Quality Management — TQM), суть которой очень проста: делать всё правильно с самого начала и до конца — стратегия, совершенно исключая ошибки! Её ценность, обусловленная требованиями современных моделей управления бизнес-процессом, подтверждается тем, что эта концепция ежегодно отмечалась престижными наградами в США (Приз М. Болдриджа), Европе (Европейский приз качества) и других странах. Компания Infineon также дважды номинировалась на Европейский приз качества (EQA) как финалист в топ-классе производителей.

Современная концепция «превентивно-го» управления качеством, представляющая собой ключевой элемент успешного управления бизнес-процессом, развилась на основе традиционных методик обеспечения качества, эволюционировавших в направлении персональной ответственности сотрудников. Лишь активность, проявляемая персоналом, позволяет раскрыть огромный потенциал компании Infineon в области обеспечения качества продукции. Благодаря этому можно говорить об оптимальном удовлетворении требований к качеству продукции, предъявляемых всеми заинтересованными сторонами — пользователями, поставщиками, акционерами и т.д., — и, конечно же, самой компанией Infineon.

15.2. Меры по обеспечению качества бизнес-процессов

В качестве примера, ниже подробно описаны меры, связанные с обеспечением качества продукции в процессе её разработки, сертификации и производства.

Меры, обеспечивающие заданные характеристики и свойства продукции, а также качество поставки

Процесс разработки продукции, основанный на использовании соответствующих спецификаций (технических условий),

подробно структурирован и описан в «Руководстве по разработке продукции». Соответствие его характеристик заданным контролируется на всех ключевых этапах процесса разработки. Для этого осуществляются контрольные оценки проекта путём заполнения соответствующих ведомостей технического контроля, входящих в состав «Руководства по разработке продукции».

В зависимости от того, в какой стадии находится процесс разработки продукции, контроль над ним осуществляется следующим образом: структурная схема изделия приводится в соответствие с техническими требованиями заказчика; принципиальная схема проверяется на соответствие со структурной схемой; расчётные электрические характеристики изделия сравниваются с характеристиками, заданными в технических требованиях заказчика.

Полученные в процессе производства опытные образцы продукции проходят приёмочные испытания (в рамках сертификации) с использованием испытательного оборудования, которое обеспечивает проверку в диапазоне напряжений и температур, заданном в технических требованиях. Здесь важно, чтобы испытания проводились в как можно более жёстком режиме, т.е. чтобы программа испытаний «перекрывала» бы все определённые в технических условиях на изделие функциональные и электрические характеристики.

По мере наращивания объёмов массового производства продукции изредка могут возникать отдельные неполадки, даже если для контроля производственного процесса используются самые передовые методы, например SPC. Поэтому меры по обеспечению качества продукции должны предусматривать выходной контроль качества.

Меры, обеспечивающие технологичность и надёжность продукции

Технологичность и надёжность полупроводниковых компонентов рассчитывается, исходя из следующих критериев:

- Возможность производства.
- Совместимость с последующими технологическими процессами (например, с процессом сборки печатной платы).
- Количество компонентов в партии, отбракованных по причине дефектов (интенсивность отказов в период приработки).

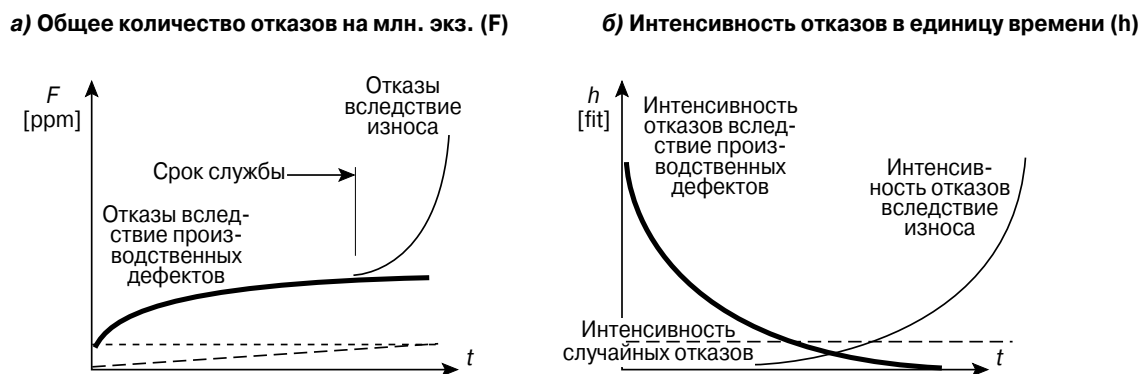


Рис. 15.1. Сравнение гистограмм для суммарного числа отказов и интенсивности отказов.

Таблица 15.1. Концепции испытаний для различных критериев качества полупроводниковых компонентов

Критерий качества	Проблема	Концепция испытаний
Возможность производства с точки зрения пользователя	Проблемы, возникающие при сборке печатной платы	Моделирование воздействий на компонент, возникающих в ходе сборочных процедур (пайки, очистки и т.д.)
Отказоустойчивость	Ранний отказ (отказ в период приработки)	Выборочные испытания готовой продукции или испытания контрольных образцов продукции, выполненных по соответствующей технологии
Долговечность	Влияние конструкции отдельных элементов устройства, а также эффектов, возникающих в процессе работы и под воздействием внешней среды	Конструктивные испытания; использование моделей ускоренных испытаний и симуляционных программных моделей
Электробезопасность	Повышенная чувствительность к воздействию электростатических разрядов и внешних электромагнитных полей	Испытания на устойчивость к ESD, контроль «тиристорного эффекта», испытания на EMC, проверка чувствительности к электромагнитным излучениям

- Рабочие характеристики полупроводниковых компонентов в реальных условиях в течение заданного срока службы (время до начала периода износа > требуемого срока службы).
- Устойчивость по отношению к внешним воздействиям (ESD, EMI, броски напряжения и т.д.).

На Рис. 15.1 показаны гистограммы для сравнения терминов «срок службы» и «интенсивность отказов».

Концепции испытаний, соответствующие тем или иным критериям, перечислены в Табл. 15.1.

На финальном этапе проектирования полупроводниковых компонентов (непосредственно перед запуском в массовую серию) в рамках их сертификации производится учёт влияния различных физических механизмов возникновения ошибок на функциональные возможности и срок службы компонентов.

15.3. Технологичность с точки зрения пользователя

В процессе сертификации полупроводниковых компонентов (проверки соответствия техническим условиям) на этапе производства, оценка их пригодности для монтажа на печатных платах или в других модулях осуществляется путём моделирования соответствующих нагрузок на компоненты. Условия пайки и допустимые величины механических и электрических нагрузок на компоненты подробно описаны в справочных руководствах на корпуса компонентов Infineon и соответствуют международным стандартам.

Подобным же образом осуществляется подготовка полупроводниковых компонентов и к другим видам испытаний. Эти испытания позволяют достоверно оценить надёжность изделий при их применении в пользовательских устройствах.

Отказы вследствие производственных дефектов

Дефекты, которые возникают в процессе производства полупроводниковых компонентов и остаются «незамеченными» даже после заключительных испытаний, затем могут стать причиной отказов в работе компонентов, причём эти отказы проявляются в ходе начального, достаточно короткого периода эксплуатации (периода приработки). Такие отказы называются статистическими, а их интенсивность непосредственно зависит от плотности дефектов, вызванных соответствующим технологическим процессом. Современные технологии характеризуются высоким уровнем качества и, следовательно, малой плотностью дефектов. Поэтому для оценки интенсивности отказов на начальном этапе эксплуатации требуются испытания очень большого количества изделий. На практике такие испытания осуществляются путём случайной выборки довольно больших партий компонентов и контроля их работы в течение длительного периода времени.

В качестве испытательной модели при тестировании используется наиболее сложное из изделий, выполненных по данной технологии. Испытания проводятся в режиме «наихудших условий» работы изделия.

Распределение по времени как общего числа отказов, так и относительной интенсивности отказов может быть представлено в виде простой экспоненциальной зависимости. На Рис. 15.2 показана графическая модель, описывающая зависимость общего

числа отказов от времени, вызванных производственными дефектами полупроводниковых компонентов, а также мгновенного и среднего значений интенсивности отказов в единицу времени $F(t)/t$. Как видно из графика, спустя 10^5 часов эксплуатации уровень отказов составляет 1000 dpm (дефектов на миллион экземпляров изделия). Значение параметра b для логических компонентов составляет в среднем 0.7.

Характеристики надёжности и их изменение в течение срока службы продукции

Описанные выше испытания позволяют оценить, может ли полупроводниковый компонент ещё до истечения требуемого срока службы выйти из строя в результате «старения» (эффект которого определяется физико-химическими свойствами используемых материалов и конструкцией тех или иных компонентов). При соответствующих вычислениях используются принципиально известные соотношения, связывающие физические механизмы отказов и условия, практически воздействующие на изделие.

Для того чтобы с помощью данной модели осуществить количественную оценку характеристик надёжности, используются упрощённые методы испытаний, которые специально адаптированы для работы в экстремальных режимах. Обзор этих методов приведён в Табл. 15.2. Использование подобной концепции позволяет гораздо оперативнее производить оценку надёжности полупроводниковых компонентов (см. также подраздел «Модели ускоренных испытаний»).

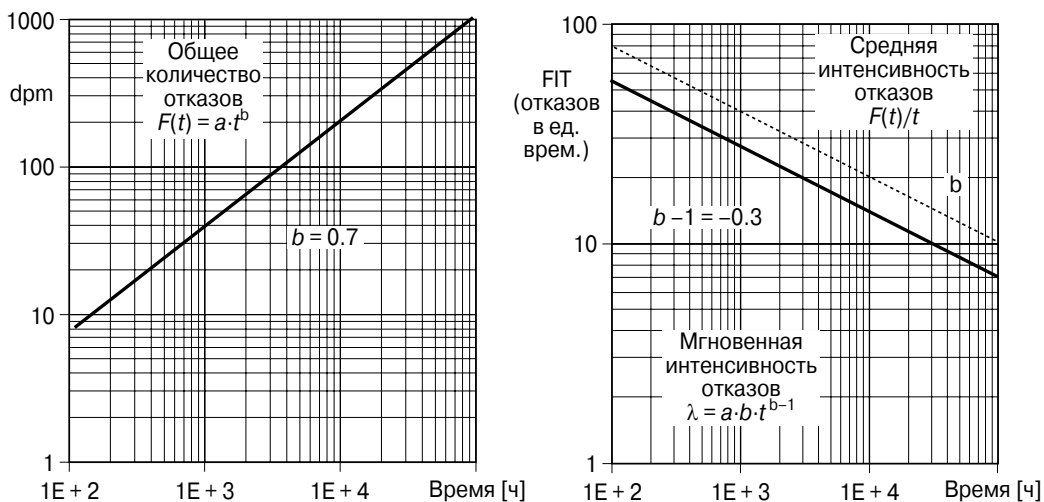


Рис. 15.2. Зависимости общего количества отказов и интенсивности отказов от времени.

Таблица 15.2. Испытания на надёжность

Воздействие/нагрузка	Испытуемые элементы	Условия испытаний	Примечания
Испытания на долговечность (с учётом конструкции испытуемых устройств и воздействия внешних факторов)			
Эксплуатационные статические/динамические: — температура — напряжённость электрического поля — плотность тока	Отдельные элементы или узлы испытуемого изделия, чувствительные к измеряемой физической величине	Условия, специфические для физических механизмов, определяющих процесс работы испытуемых элементов	Значения параметров должны выходить за рамки предельно допустимых для данного компонента (испытания в «экстремальном» режиме)
Обусловленные окружающими условиями: — температура — относительная влажность — перепад температур	Отдельные типы корпусов (пластиковые)	Соответствующие максимально допустимым режимам работы, например: +150°C 85% (при +85°C) —40/+150°C	—
Испытания на работоспособность (обычно выполняются в максимальных режимах работы изделия или в условиях, указанных производителем)			
Электрические процессы	Изделие в целом	Зависят от функции испытуемого компонента, например: статические / динамические / цикл перезапуска / цикл чтения/стирания данных	Для всего ожидаемого срока службы компонента
Испытания для оценки надёжности на начальном этапе (обычно выполняются в максимальных режимах работы изделия или в условиях, указанных производителем)			
Надёжность на начальном этапе эксплуатации	Типичный представитель семейства полупроводниковых компонентов, выполненных по одной и той же технологии	Зависят от функции испытуемого компонента, например: статические / динамические / цикл перезапуска	Для всего ожидаемого срока службы компонента
Испытания на технологичность (с точки зрения OEM-производителей), часто предшествуют испытаниям, связанным с оценкой влияния окружающей среды			
Нагрев при пайке	Отдельные типы корпусов (пластиковые)		—
	Корпуса для монтажа в сквозные отверстия	Заданная характеристика распределения тепла при пайке	—
Влажность окружающей среды при хранении и транспортировке изделия	Корпуса для поверхностного монтажа	Предварительная обработка* + заданная характеристика распределения тепла при пайке	* Моделируется эффект поглощения влаги
Испытания на устойчивость к внешним электрическим воздействиям и нагрузкам			
Электростатический разряд (ESD)	Изделие в целом	— модель человеческого тела (HBM) — модель заряженного устройства (CDM)	—
Тиристорный эффект	Изделие в целом	—	—
Электромагнитные помехи (EMI)	Изделие в целом	—	—

Указанные испытания следует проводить на как можно более раннем этапе разработки новой технологии производства изделий, и их результаты должны немедленно учитываться в обязательных проектных нормативах. Соблюдение этих норм позволит обеспечить длительный срок службы всех полупроводниковых компонентов,

произведённых по данной технологии. В Табл. 15.3 перечислены наиболее существенные факторы, влияющие на характеристики надёжности полупроводниковых компонентов в течение всего периода эксплуатации и непосредственно определяющие срок службы этих компонентов.

Таблица 15.3. Факторы надёжности, влияющие на срок службы полупроводниковых компонентов

Характеристики полупроводникового компонента	Физические процессы	Воздействующие факторы
Стабильность электрических параметров активных переключательных элементов	– Захват заряда (эффект горячих носителей)	E, T
	– Дрейф ионных примесей	E, T
Временная зависимость пробоя диэлектрических (оксидных) слоёв	– Захват заряда	E, T
Стабильность контактов и путей протекания тока	– Взаимная диффузия различных металлов с образованием разрывов	T
	– Электромиграция	J, T
Эксплуатационная надёжность компонента: – термомеханическая нестабильность работы отдельных элементов – плотность отказов	– Образование трещин	ΔT
	– Механическая усталость материалов в точках соединений	ΔT , количество циклов
	– Коррозия	Относительная влажность
	– Миграция механических напряжений в материале	
<i>Примечание.</i> T — температура; ΔT — интервал температур; E — напряжённость электрического поля; J — плотность тока.		

Устойчивость к электрическим воздействиям

Данный аспект оценки надёжности полупроводниковых компонентов посвящён их поведению в условиях повышенных электрических нагрузок, вызванных воздействием электростатических полей и разрядов (ESD), а также возникающих как результат влияния внешних устройств (электромагнитные излучения, «тиристорный эффект» и т.п.).

Соответствующие характеристики компонентов определяются, прежде всего, их внутренней схемотехникой. Компания Infineon на ранних этапах разработки новых технологий производства полупроводниковой продукции использует общепринятые

международные методики компьютерного моделирования и испытаний. Результаты этих испытаний учитываются в обязательных проектных нормативах и позволяют прогнозировать характеристики надёжности вновь разрабатываемых полупроводниковых компонентов.

Модели ускоренных испытаний

Для того чтобы оценивать надёжность полупроводниковых компонентов в реальных рабочих условиях с помощью испытаний, результаты которых получены в условиях повышенных нагрузок, компания Infineon использует модели ускоренных испытаний. В Табл. 15.4 перечислены четыре основные ускоренные модели.

Таблица 15.4. Модели ускоренных испытаний, используемые при испытаниях полупроводниковых компонентов

Воздействующий фактор и модель	Математическое выражение
Температура Модель Аррениуса	$AF(T) = \exp \frac{\Delta E}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{use}}} \times \frac{1}{T_{\text{stress}}} \right)$
Температура и напряжение смещения Модель Эйринга	$AF(V, T) = AF(T) \exp B(V_{\text{stress}} - V_{\text{use}})$ Параметр B зависит от физического механизма работы элемента или технологии. По умолчанию $B = 1$.
Температура и влажность Модель Пека (применяется для учёта эффекта коррозии в пластиковых корпусах)	$AF(rh, T) = \left(\frac{rh_{\text{stress}}}{rh_{\text{use}}} \right)^n \times AF(T)$ $n = 3, \Delta E = 0.9 \text{ эВ}$
Термоциклы Модель Коффина-Мэнсона (применяется для оценки эффекта усталости металла в паяных/сварных соединениях)	$AF(\Delta T) = \left(\frac{\Delta T_{\text{stress}}}{\Delta T_{\text{use}}} \right)^c \times \frac{f_c \text{ stress}}{f_c \text{ use}}$ Параметр C зависит от физического механизма работы элемента или технологии. По умолчанию $C = 2$.
ΔE — кажущаяся энергия активации [эВ] k — постоянная Больцмана ($8.617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К или $1.381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К) T — температура кристалла [К] V — напряжение смещения [В]	rh — относительная влажность [%] ΔT — температура [°С или К] f_c — количество циклов в единицу времени [1/ч] AF — коэффициент ускорения

Термическое напряжение (модель Аррениуса)

Среднее значение кажущейся энергии активации составляет 0.5...0.7 эВ.

Термическое и электрическое напряжение (модель Эйринга)

В данной модели в качестве дополнительного активирующего фактора, относящегося к эффекту пробоя оксидного слоя полупроводниковой МОП-структуры, служит рабочее напряжение. Введение эмпирического коэффициента B позволяет учесть толщину оксидного слоя.

Воздействие температуры и влажности (модель Пека)

Данная модель основана на статистической оценке результатов достаточно большого количества экспериментов с различными исходными данными. В качестве максимального значения здесь применяется рабочее напряжение. За контрольную точку обычно принимаются значения температуры +85°С и относительной влажности воздуха 85%, что соответствует типичным условиям испытаний.

Циклическое термическое воздействие (модель Коффина-Мэнсона)

Данная модель наиболее хорошо подходит для оценки долговечности полупроводниковых компонентов в пластиковых корпусах. Она описывает механизм отказов, который вызывается эффектом «усталости» материала в паяных или сварных контактах.

Итак, перечисленные в **Табл. 15.4** основные модели ускоренных испытаний представляют собой важную часть системы оценки надёжности полупроводниковых компонентов. Большинство этих моделей опираются не на один конкретный физический механизм возникновения отказов, а позволяют учесть эффект совместного воздействия нескольких различных механизмов. Целью использования каждой из указанных моделей является определение так называемого коэффициента ускорения AF , который затем может быть пересчитан в ожидаемое время безотказной работы компонента с помощью следующего выражения:

$$T_{\text{use}} = AF \cdot t_{\text{stress}}$$

Из Рис. 15.3...15.4 видно, что расширение условий испытаний оказывает ускоряющий эффект на физические механизмы, потенциально «ответственные» за возникновение отказов полупроводниковых компонентов. Достижимый уровень ускорения зависит от параметров выбранной модели, значения которых обусловлены влиянием нескольких различных механизмов (при этом один из этих механизмов может быть доминирующим).

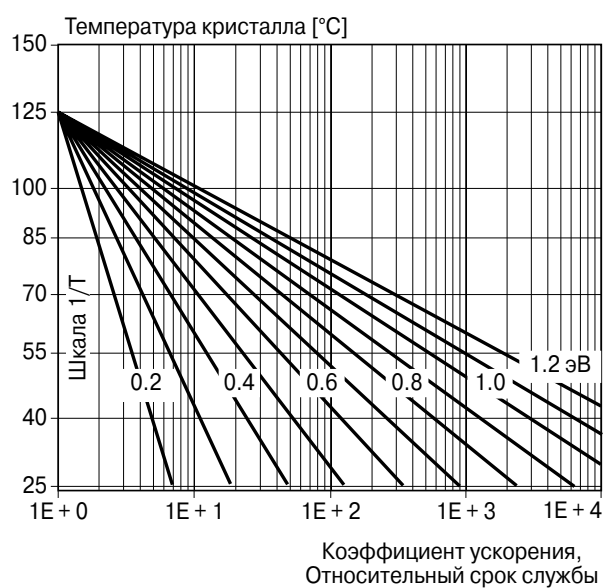


Рис. 15.3. Температурная зависимость коэффициента ускорения и относительного срока службы испытуемых изделий (модель Аррениуса).

Кривые постоянного коэффициента ускорения
(определяет относительный срок службы)

Условия испытаний: +85°C, относит. влажность 85%

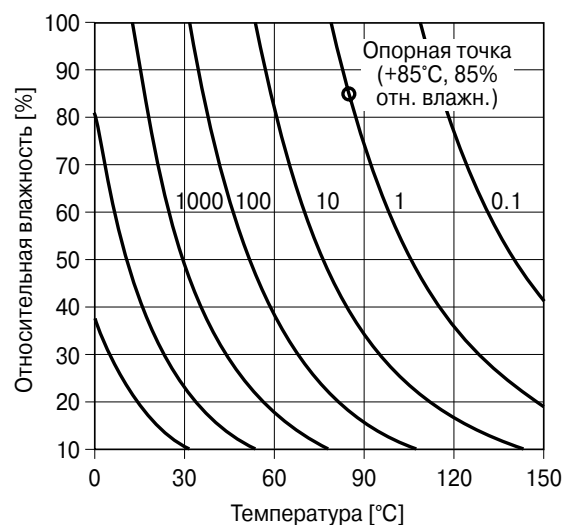


Рис. 15.4. Зависимость коэффициента ускорения и относительного срока службы испытуемых изделий от температуры и влажности (модель Пека).