

Раздел 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ УСТРОЙСТВ НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ

СОДЕРЖАНИЕ

5.1. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭС на этапе проектирования.....	89
5.2. Априорное (начальное) ограничение нагрузки элементов как метод повышения надёжности РЭУ.....	89
5.3. Выбор коэффициентов нагрузки с учётом производственного разброса параметров элементов и питающих напряжений.....	90
5.4. Расчёт норм надёжности на составные части РЭУ.....	91
5.5. Схемотехнические способы повышения надёжности РЭУ.....	93
5.6. Квазирезервирование.....	94
5.7. Общая характеристика методов обеспечения надёжности на этапе производства.....	94
5.8. Тренировка как способ отбраковки потенциально ненадёжных элементов.....	95
5.9. Практические приёмы тренировки полупроводниковых приборов.....	97
5.10. Технологический прогон РЭУ.....	99
5.11. Отбраковка элементов методами индивидуального прогнозирования надёжности.....	100
5.12. Общая характеристика методов построения прогнозирующего правила.....	101
5.13. Методы статистических решений.....	102
5.14. Метод потенциальных функций.....	104
5.15. Метод дискриминантных функций.....	105
5.16. Метод пороговой логики.....	106
5.17. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭС на этапах эксплуатации.....	107
5.18. Прогнозирование постепенных отказов методом экстраполяции (случай однопараметрических устройств).....	107
5.19. Прогнозирование работоспособности многопараметрических устройств.....	108

Раздел 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ УСТРОЙСТВ НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ

5.1. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭС на этапе проектирования

Известно, что надёжность РЭУ закладывается на этапе проектирования. Если будет заложен недостаточный уровень надёжности, то этапы изготовления (производства) и эксплуатации задачу обеспечения надёжности не решат.

Основными методами, обеспечивающими требования к показателям надёжности на этапе проектирования, являются следующие:

1. Удачность конструктивного исполнения РЭУ (удачность компоновки).
2. Выбор для конструкции высоконадёжных комплектующих элементов и изделий и защита их от воздействия дестабилизирующих факторов.
3. Правильный выбор элементов с точки зрения их устойчивости и стойкости к действию факторов окружающей среды. Очень важно обеспечить какие-то запасы по температуре, уровню механических воздействий и т.д.
4. Правильный выбор электрических режимов работы элементов. Недопустимо использовать элементы с коэффициентом электрической нагрузки $K_n > 1$.
5. Правильный выбор материалов конструкции. Старение материалов должно быть таким, чтобы их долговечность (ресурс, срок службы) отвечала требованиям надёжности.
6. Использование для изготовления конструкции проверенных совершенных технологических процессов.
7. Правильный (удачный) выбор электрических схем.
8. Использование резервирования. Его можно рассматривать как крайнюю меру, так как резервирование наряду с повышением надёжности ухудшает целый ряд других показателей качества (увеличиваются габариты, масса, стоимость).

5.2. Априорное (начальное) ограничение нагрузки элементов как метод повышения надёжности РЭУ

Экспериментально установлено, что зависимость интенсивности отказов элементов λ от коэффициента нагрузки K_n при фиксированной температуре t носит явно нелинейный характер. Например,

применительно к резисторам постоянного сопротивления зависимость имеет вид, показанный на рис.5.1.

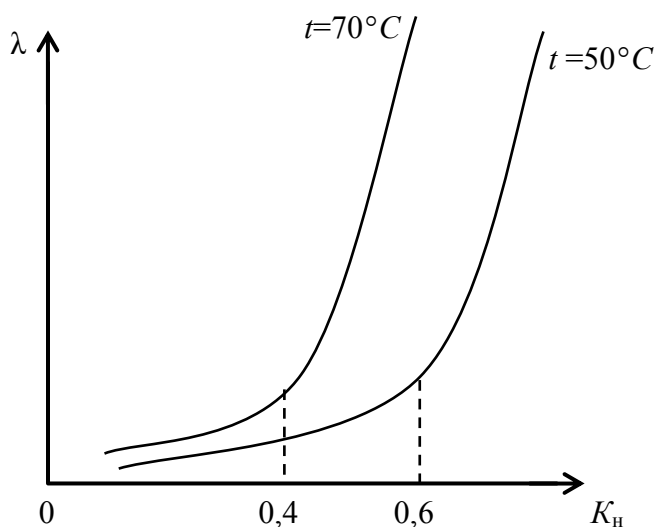


Рис. 5.1. График зависимости интенсивности отказов элементов λ от коэффициента нагрузки K_n

При проектировании аппаратуры стремятся обеспечить тепловой режим так, чтобы перегрев в РЭУ составлял не более $\Delta T \approx 20^\circ\text{C}$. С учётом максимальных рабочих температур, регламентируемых для РЭУ в стандартах (ГОСТ 15150-69), получается, что максимальная температура на корпусах элементов составляет $50...70^\circ\text{C}$.

Из графиков (см. рис. 5.1) видно: чтобы не происходило резкого возрастания интенсивности отказов, необходимо,

чтобы выполнялось условие $K_n \leq 0,4...0,6$. На этом основан принцип начального ограничения коэффициентов электрической нагрузки элементов. В промышленности существуют рекомендации по выбору значений K_n для различных видов элементов на основе этого принципа.

Максимальное предельное значение K_n указывается в документации на элементы (ТУ). Если же требуется спроектировать аппаратуру повышенного уровня надёжности, то мы должны также принять во внимание рекомендации о предельных значениях K_n с учётом нелинейности зависимости $\lambda = \varphi(K_n)$.

5.3. Выбор коэффициентов нагрузки с учётом производственного разброса параметров элементов и питающих напряжений

Для РЭУ массового и серийного производства реальные коэффициенты нагрузки одних и тех же элементов могут заметно отличаться. Отличие объясняется производственным разбросом параметров элементов и питающих напряжений. При проектировании аппаратуры для массового и серийного производства необходимо во внимание принять не только значения K_n , найденные с учётом номинальных (средних) нагрузок, но и экстремальный режим работы каждого элемента (рис.5.2). Под этим режимом для данного элемента понимают такое неблагоприятное сочетание разброса, как параметра

этого элемента, так и параметров соседних элементов и питающих напряжений, при котором коэффициент нагрузки рассматриваемого элемента принимает максимальное значение.

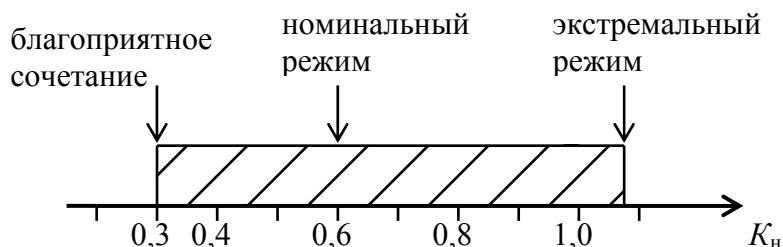


Рис. 5.2. Влияние разброса параметров элементов на коэффициент нагрузки

Замечено, что в основном для каждого элемента имеет место своё неблагоприятное сочетание разброса параметров, причём диапазон, в котором оказываются реальные значения K_n различен для разных элементов.

При проектировании аппаратуры необходимо принять во внимание значения K_n с учётом экстремальных режимов работы элементов. Эти значения могут быть найдены как расчётным методом, так и экспериментальным способом с использованием макетов устройств. Чтобы не допустить ошибку при выборе элементов по K_n от разработчика требуют так называемую «карту электрических режимов». Образец оформления такой карты имеет вид (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Карта электрических режимов

Обозначение на электрической схеме	Тип элемента	Номинальные значения основных электрических элементов	Контролируемые параметры режима						Примечание
			1		2		3		
			P_{1cp}	$K_{н1max}$	P_{2cp}	$K_{н2max}$	P_{3cp}	$K_{н3max}$	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

P_1, P_2, P_3 – параметры электрического режима. Как правило, наличие карт электрических режимов контролируется заинтересованными организациями

5.4. Расчёт норм надёжности на составные части РЭУ

Норма надёжности – это требование к показателям надёжности конкретной части РЭУ.

Процедуру определения требований к показателям надёжности составных частей РЭУ, основываясь на заданном требовании к надёжности РЭУ в целом, называют расчётом норм надёжности.

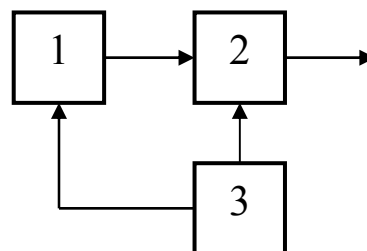
На практике при выполнении этого расчёта принимают во внимание структурную сложность составных частей РЭУ (количество элементов N) и пользуются предположением об их экспоненциальном законе надёжности.

Пример.

$$N_1=450, N_2=250, N_3=300,$$

$$P(t = 1000 \text{ ч}) = 0,9.$$

$$P_1(t) - ? \quad P_2(t) - ? \quad P_3(t) - ?$$



Решение.

1. Предполагаем, что функциональные части в РЭУ и элементы в составе функциональных частей с точки зрения надёжности соединены последовательно. Принимая во внимание предположение об экспоненциальном законе надёжности РЭУ, можно записать:

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

где λ – суммарная интенсивность отказов элементов РЭУ в целом;

$$\lambda = -\ln p(t)/t = \ln 0,9/1000 = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda = \lambda_{\text{эл}} N_{\text{РЭУ}},$$

где $\lambda_{\text{эл}}$ – интенсивность отказов элемента, требуемая для обеспечения надёжности РЭУ в целом;

$N_{\text{РЭУ}}$ – количество элементов в РЭУ.

В данном примере $N_{\text{РЭУ}} = N_1 + N_2 + N_3$.

$$\lambda_{\text{эл}} = \lambda / N_{\text{РЭУ}} = 1,05 \cdot 10^{-4} / (450 + 250 + 300) = 1,05 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч}.$$

2. Очевидным является выражение

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3,$$

где λ_i – относится к соответствующим блокам.

Определяем суммарные интенсивности отказов элементов блоков 1, 2 и 3. Получим

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{эл}} N_1 = 4,74 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda_2 = 2,63 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda_3 = 3,16 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч}.$$

3. Находим требуемые вероятности безотказной работы блоков:

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t} = 0,954;$$

$$P_2(t) = 0,974;$$

$$P_3(t) = 0,969.$$

5.5. Схемотехнические методы повышения надёжности РЭУ

Радикальным способом повышения надёжности схемотехническими методами является использование резервирования и встроенных систем автоматического диагностирования РЭУ. Однако это заметно ухудшает некоторые технико-экономические показатели (масса, габариты, стоимость), поэтому использование указанного подхода является в большинстве случаев вынужденной мерой.

В общем случае при выборе схем надо исходит из следующих соображений:

1. Схема должна иметь минимальное количество элементов. Эффект выигрыша в надёжности в этом случае объясняется с помощью основного расчётного соотношения для безотказности РЭУ:

$$P_{\text{РЭУ}}(t_3) = P_1(t_3) \cdot P_2(t_3) \cdot \dots \cdot P_N(t_3). \quad (5.1)$$

Так как $P_i(t_3) < 1$, то чем меньше сомножителей в выражении, тем больше уровень безотказности РЭУ. Введение в схему дополнительных элементов всегда должно оправдываться улучшением каких-то свойств РЭУ, например повышением помехозащищённости, улучшением температурной стабильности.

2. Выходные параметры РЭУ должны быть малокритичны к заметным изменениям параметров элементов. Это существенно повысит уровень параметрической надёжности. Нежелательно использование схем, требующих подбора параметров элементов.

3. Схема должна устойчиво работать в широком диапазоне изменений питающих напряжений. Надо стремиться использовать схемы, не требующие стабилизирования источников питания, усложняющих РЭУ в целом.

4. Надо избегать использования схем (по возможности), требующих подстроечных и регулировочных элементов.

На практике не всегда удается выбрать схему, отвечающую всем указанным требованиям. Приходится находить разумный компромисс между указанными требованиями.

5.6. Квазирезервирование

Для сложных РЭУ не всегда требуется выполнение функций в полном объеме. При проектировании таких устройств необходимо предусмотреть возможность настройки (адаптации) устройства на выполнение требуемых функций в нужном объеме. Тогда оставшаяся избыточность может использоваться для резервирования. Такой способ повышения надёжности называют **квазирезервированием**.

Поясним примером. Пусть для выполнения функций в максимальном объеме от передатчика требуется мощность P . Тогда для обеспечения этой мощности надо предусмотреть не один передатчик, а например три с мощностью $(1/3)P$ каждого. Если в конкретном случае для выполнения функций требуется мощность не более $(1/3)P$, то это обеспечивается одним передатчиком, два других же могут использоваться для резервирования и кратность резерва в этом случае составит 2:1. Однако следует знать, что резервирование возможно лишь в случаях, когда не требуется выполнения функций в полном или почти полном объеме.

5.7. Общая характеристика методов обеспечения надёжности на этапе производства

Как отмечалось, на долю ошибок производства приходится до 30-40% всех отказов РЭУ. Поэтому следует знать, что процесс производства должен быть организован таким образом, чтобы полностью реализовать уровень надёжности РЭУ, заложенный на этапе проектирования.

Мероприятия, связанные с обеспечением надёжности на этапе производства можно свести к следующим основным группам:

1. Строгое соблюдение разработанной технологии изготовления РЭУ и совершенствование технологии производства. Здесь должное внимание нужно уделить автоматизации производства, позволяющей в значительной степени снизить влияние на надёжность субъективного фактора.
2. Входной контроль комплектующих элементов и материалов.
3. Тренировка элементов и РЭУ.

4. Отбраковка потенциально ненадежных элементов методами неразрушающего контроля.
5. Отбор элементов требуемого уровня надёжности методами индивидуального прогнозирования.

Что касается технологии изготовления, то следует не забывать, что любое отклонение технологического процесса от нормы вызывает отклонение каких-то параметров или свойств РЭУ. Неточное совпадение режимов обработки материалов, пропитки, монтажно-сборочных работ и других технологических операций вначале может не вызвать заметных отклонений выходных параметров, но в последствии обязательно скажется на долговечности (уменьшение ресурса и срока службы), а также приведёт к ухудшению такой составляющей надёжности, как безотказность.

5.8. Тренировка как способ отбраковки потенциально ненадежных элементов

Тренировка – такой способ отбраковки ненадежных элементов, при которой элементы заставляют работать в таких условиях и (или) электрических режимах, при которых потенциально ненадежные элементы быстро отказывают, а хорошие элементы при этом не повреждаются и их рабочий ресурс практически не расходуется.

Виды тренировок различаются в зависимости от условий использования элементов при выполнении процедуры тренировки и наличия или отсутствия при этом электрического режима. Во многих случаях тренировку выполняют в условии наличия лишь повышенной температуры. Ее называют **термотренировкой**.

Если используется только электрический режим, то тренировка называется **электротренировкой**.

В ряде случаев используются совместно повышенные температуры и электрический режим. Тренировку в этом случае называют **электротермотренировкой**.

Возникает вопрос, всегда ли тренировка целесообразна. Для ответа на него обратимся к распределению Вейбулла, которое можно рассматривать как обобщенный закон распределения времени до отказа элементов РЭУ.

Плотность распределения времени до отказа в случае закона Вейбулла имеет вид

$$w(t) = \rho \beta t^{\beta-1} e^{-\rho t^{\beta}}, \quad (5.2)$$

где ρ, β – параметры распределения;
 β – коэффициент формы.

Известно, что интенсивность отказов как функция времени представляется выражением

$$\lambda(t) = w(t)/P(t); \quad (5.3)$$

С учётом выражения (5.2)

$$P(t) = \int_0^t w(t) dt = e^{-\rho t^\beta} \quad (5.4)$$

Следовательно,

$$\lambda(t) = \rho \beta t^{\beta-1}. \quad (5.5)$$

Построим графики для величины $\lambda(t)$ при различных значениях коэффициента формы β (рис. 5.3). Анализируя графики, можно сделать следующие выводы.

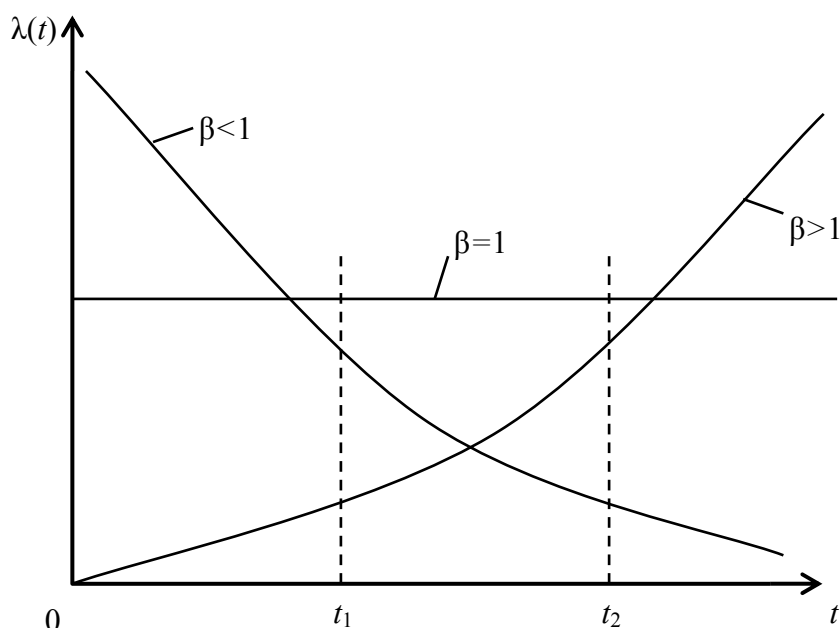


Рис. 5.3. Зависимость интенсивности отказов от времени работы

Предположим, что тренировка выполняется в течение интервала времени $(0; t_1)$, тогда из графиков видно:

1. При $\beta > 1$ средняя интенсивность отказов на интервале времени $(t_1; t_2)$, равном интервалу $(0; t_1)$ оказывается выше нежели в случае, когда тренировка не выполнялась бы. Поэтому в случае, когда $\beta > 1$ трени-

ровка не улучшает, а наоборот ухудшает надёжность элементов.

2. При $\beta = 1$ средняя интенсивность отказов на интервале $(t_1; t_2)$ совпадает с интенсивностью отказов на интервале $(0; t_1)$. Следовательно в этом случае тренировка не улучшает, но и не ухудшает надёжность элементов. С учётом того, что тренировка требует затрат, её проведение в этом случае нецелесообразно. Поэтому для таких элементов как резисторы и конденсаторы, время до отказа которых

неплохо описывается экспоненциальным распределением, проводить тренировку не имеет смысла.

3. При $\beta < 1$ средняя интенсивность отказов на интервале $(t_1; t_2)$ ниже, нежели на интервале $(0; t_1)$, т.е. тренировка в этом случае повышает надёжность элементов и, следовательно, её проводить имеет смысл. Напомним, что распределением Вейбулла при $\beta < 1$ неплохо описываются отказы большинства типов полупроводниковых приборов и ИМС. Причём для *Ge*-приборов $\beta \approx 0,4$, *Si*-приборов – $\beta \approx 0,6$. Следовательно, $\beta_{\text{ср.}} \approx 0,5$ по всей массе приборов.

Подробно с теоретическим обоснованием тренировки можно ознакомиться в §5.33 учебника [1].

Легко показать, что при нормальном законе распределения времени до отказа интенсивность отказов увеличивается. Следовательно, тренировка в этих случаях не улучшит уровень надёжности элементов, поэтому для таких элементов, как ЭЛТ, кинескопы, элементы коммутации, механические элементы тренировку проводить не следует, т.к. она не повысит уровень надёжности, а приведёт лишь к выработке рабочего ресурса элементов.

5.9. Практические приёмы тренировки полупроводниковых приборов

На практике широко используют тренировку для БТ, причём выполняют либо термотренировку, либо электро-термотренировку. Реже выполняют электротренировку.

Перед проведением тренировки выборку полупроводниковых приборов проверяют на соответствие требованиям технических условий (ТУ). Экземпляры, не отвечающие требованиям ТУ, сразу отбраковываются. После этого выполняют тренировку в течение определенного времени. После завершения тренировки все экземпляры выборки снова проверяют на соответствия требованиям ТУ. Элементы с физическим отказом (пробой, КЗ) и, не отвечающие по параметрам требованиям ТУ, отбраковывают. Оставшиеся элементы считаются надёжными и поступают для сборки устройств. При этом надо помнить, что в случае термо- и электро-термотренировки, перед измерением функциональных параметров элементы выдерживают в условиях нормальной температуры 0,5-2 часа.

Ниже приводятся типовые схемы подачи обратных напряжений на коллекторный переход в случае электро- и электро-термотренировки (рис. 5.4).

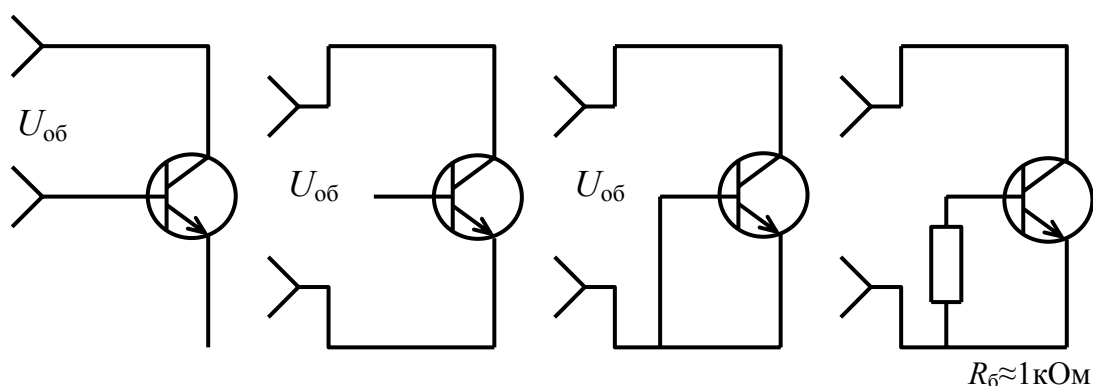


Рис. 5.4. Типовые схемы подачи обратных напряжений

Экспериментально установлено, что при выполнении электротренировки в случае подачи на коллекторный переход предельно допустимого по ТУ напряжения $U_{об}$ испытания ускоряются примерно в 10 раз.

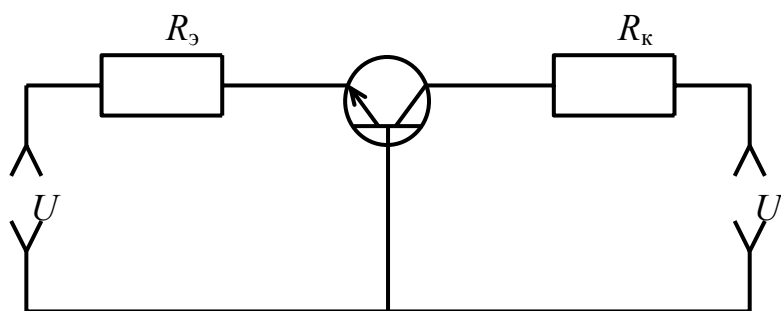


Рис. 5.5. Схема для выполнения электротренировки

При выполнении электротренировки во многих случаях используют схему (рис. 5.5). Причём сопротивления $R_э$ и $R_к$ выбираются такими, чтобы мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора, не превышала предельно допустимую по ТУ.

Во многих случаях стремятся обеспечить падение напряжения на резисторе $R_к$, равное половине $U_к$. В данном случае мощность, рассеиваемая на транзисторе, разогревает кристалл, что равносильно действию чисто тепловой нагрузки.

При реализации термотренировки возникает вопрос, в условиях какой температуры должна находиться выборка полупроводниковых приборов. Известно, что действие электрической нагрузки равносильно некоторой эквивалентной температуре, разогревающей кристалл. Разность ΔT между температурой кристалла $T_к$ и температурой окружающей среды $T_{ос}$, вызывающая такое же действие, как и мощность, рассеиваемая на транзисторе, определяется выражением

$$\Delta T = R_T \cdot K_H \cdot P_{\max}, \quad (5.6)$$

где $\Delta T = T_к - T_{ос}$;

- R_T – тепловое сопротивление кристалл-окружающая среда, приводимое в документации полупроводниковый прибор, $[R_T] = ^\circ\text{C}/\text{Вт}$;
- K_H – коэффициент электрической нагрузки по мощности;
- P_{\max} – максимально допустимая рассеиваемая мощность при температуре, равной значению T_{oc} .

При термотренировке возникает следующая ситуация: перегрев ΔT необходим для создания условий, соответствующих рабочему электрическому режиму, а дальнейшее повышение температуры вызывает ускорение наработки. Естественно, возникает вопрос, до каких пределов можно повышать температуру при реализации термотренировки. Экспериментально установлено, что применительно к кремниевым полупроводниковым приборам до температуры $+160\text{ }^\circ\text{C}$ всегда соблюдается условие автомоделности отказов, т. е. механизм отказов такой же, как и в нормальных условиях эксплуатации, только отказы по времени происходят раньше.

При более высоких температурах с помощью типовых методик надо доказать, что автомоделность отказов не будет нарушена.

В условиях практики так же возникает вопрос о длительности тренировки. Во многих случаях она определяется, исходя из экономических затрат, необходимых на проведение тренировки, либо долей полупроводниковых приборов, которые должны остаться работоспособными после окончания тренировки.

5.10. Технологический прогон РЭУ

В сложные РЭУ, как правило, входят элементы с различными законами распределения времени до отказа, поэтому для таких РЭУ всегда существует период приработки на λ -характеристике (рис. 5.6). В условиях производства РЭУ стараются уйти из периода приработки (область A на рис. 5.6). С этой целью устройства принудительно заставляют принудительно работать в течение определенного времени. В процессе такой работы некоторые экземпляры отказывают, подвергаются ремонту и далее снова ставятся в работу.

Указанную процедуру называют тренировкой РЭУ или технологическим прогоном.

Технологический прогон позволяет увеличить надёжность устройств, поступающих потребителю. Возникает вопрос, какова должна быть длительность технологического прогона. К сожалению, длительность периода приработки для разных устройств различна и неизвестна.

Оптимальной является длительность технологического прогона, соответствующая окончанию периода приработки (точка B на рис. 5.6).

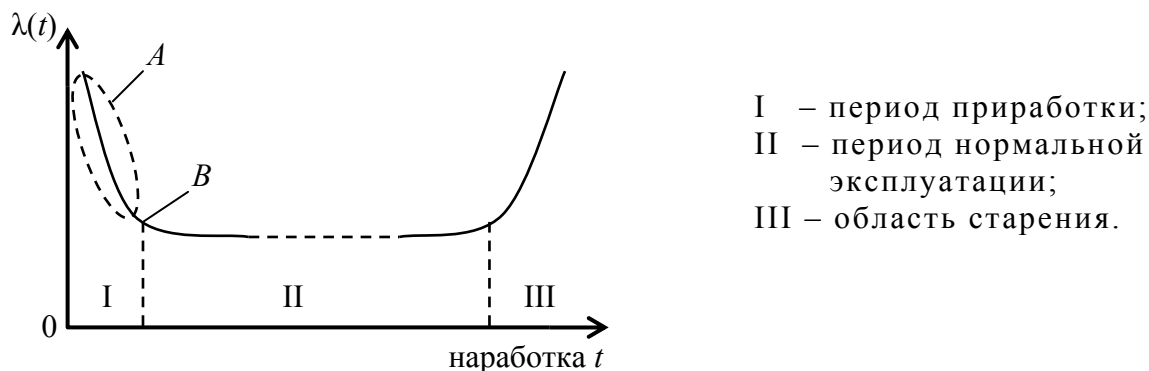


Рис. 5.6. Типичная λ -характеристика РЭУ

В реальных условиях длительность технологического прогона во многих случаях определяется экономическими факторами. Выполняя технологический прогон, иногда прибегают к ускоренным испытаниям с целью сокращения времени технологического прогона.

5.11. Отбраковка элементов методами индивидуального прогнозирования надёжности

На практике находят применение методы, основанные на использовании информативных параметров. Эти методы иначе называются методами распознавания образов (см. [1]). Под информативным понимается такой электрический параметр элемента, значение которого в момент $t = 0$ несёт информацию о надёжности конкретного экземпляра.

Для того чтобы параметр мог рассматриваться в качестве информативного необходимо, чтобы между этим параметром и уровнем надёжности элемента имела место корреляционная связь (рис. 5.7).



Рис. 5.7. Корреляция между уровнем надёжности и параметром x

Для выполнения индивидуального прогнозирования используется прогнозирующее правило, общий вид которого

$$j \in K_1, \text{ если } F[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}] \geq P_0;$$

$$j \in K_2, \text{ если } F[x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}] < P_0,$$

где j — рассматриваемый экземпляр;
 K_1 — класс надёжных экземпляров на момент времени $t_{\text{пр}}$ — заданное время прогнозирования;

K_2 — класс ненадёжных экземпляров на момент времени $t_{\text{пр}}$;

F — решающая функция, подсчитанная для j -го экземпляра;

- $x_1^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$ – значения информативных параметров j -го экземпляра в момент времени $t=0$ (образ j -го экземпляра);
- k – число информативных параметров, используемых для прогнозирования;
- P_0 – порог разделения классов; представляет собой число, выбираемое экспериментально из условия лучшего разделения выборки элементов на классы.

Расстановка знаков $\geq, <$ в записанном прогнозирующем правиле понятна из рис. 5.8.

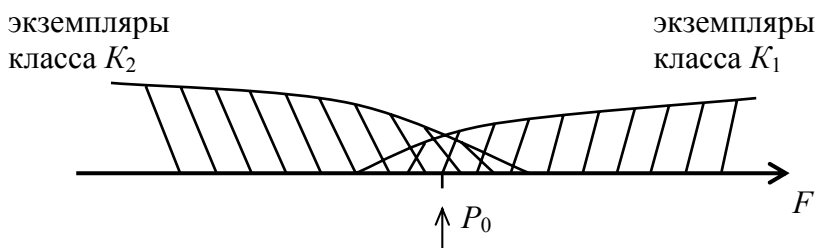


Рис. 5.8. Выбор порога разделения классов

Напомним, [1], что прогнозирующее правило получают с помощью предварительного исследования выборки интересующего типа элементов объемом n экземпляров (рис. 5.9).

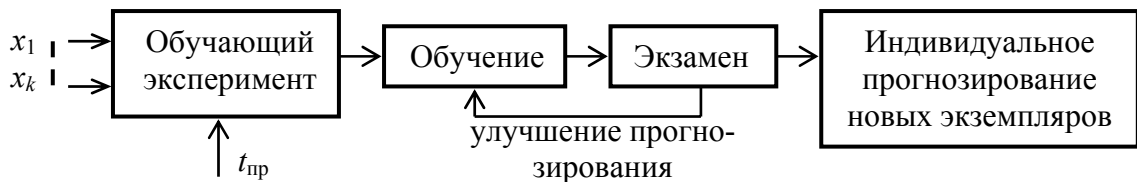


Рис. 5.9. Этапы решения задачи методом распознавания образов

5.12. Общая характеристика методов построения прогнозирующего правила

Условно эти методы делятся на две группы:

- параметрические;
- непараметрические.

В параметрических методах предполагают известными законы распределения информативных параметров для класса K_1 и для класса K_2 (рис. 5.10).

По результатам же обучающего эксперимента находят параметры этих законов распределения. В практике получил распространение случай гипотезы о нормальном законе распределения информативных параметров в классах.

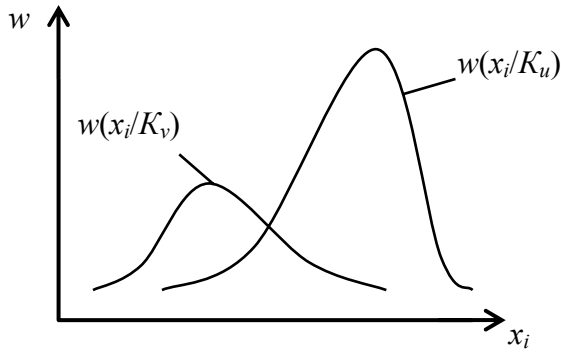


Рис. 5.10. Распределение информативного параметра

В непараметрических методах исходят из предположки, что законы распределения информативных параметров в классах априорно не известны. Методы основаны на использовании эвристических алгоритмов. По результатам обучающего эксперимента находят величины (коэффициенты), входящие в эти алгоритмы.

5.13. Метод статистических решений

Представителем параметрических методов является метод статистических решений в предположении, что распределение информативных параметров в классах K_1 и K_2 подчиняется нормальному закону.

Решающая функция в этом методе представляет собой отношение правдоподобия, определяемое для j -го экземпляра как

$$\lambda^{(j)} = \frac{w(x_1^{(j)} / K_1) \cdot \dots \cdot w(x_k^{(j)} / K_1)}{w(x_1^{(j)} / K_2) \cdot \dots \cdot w(x_k^{(j)} / K_2)}. \quad (5.7)$$

Выражение справедливо для случая, когда информативные параметры x_1, \dots, x_k являются независимыми, следовательно, некоррелированными. Этим предположением часто пользуются, решая прикладные задачи.

Для того, чтобы подсчитать $\lambda^{(j)}$ необходимо по каждому признаку (информативному параметру) иметь следующую информацию:

$$m_i^{(K1)}, \sigma_i^{(K1)}, m_i^{(K2)}, \sigma_i^{(K2)},$$

где $m_i^{(K1)}, m_i^{(K2)}$ — математическое ожидание i -го признака в классах K_1 и K_2 ;

$\sigma_i^{(K1)}, \sigma_i^{(K2)}$ — среднее квадратическое отклонение i -го признака в классах K_1 и K_2 .

Указанные характеристики определяют, используя результаты обучающего эксперимента. С помощью табл. 5.2 покажем, какие характеристики и как получать по результатам обучающего эксперимента в случае двух признаков x_1 и x_2 .

Таблица 5.2

Результаты обучающего эксперимента

Номер экземпляра обучающей выборки	x_i при $t=0$		Класс на момент $t_{пр}$
	x_1	x_2	
1	73	1,2	K_1
2	52	0,9	K_1
...
n_1	61	1,7	K_1
n_1+1	37	2,1	K_2
...
n	43	2,0	K_2

Величины $m_1^{(K1)}$ и $\sigma_1^{(K1)}$ первого признака находят, используя номера экземпляров с первого по n_1 столбца x_1 . Величины $m_1^{(K2)}$ и $\sigma_1^{(K2)}$ первого признака находят, используя номера экземпляров с n_1+1 по n столбца x_1 . Столбец x_2 используется аналогично для получения величин $m_2^{(K1)}$, $\sigma_2^{(K1)}$ и $m_2^{(K2)}$, $\sigma_2^{(K2)}$.

Подсчитанные характеристики « m » и « σ » нужны для того, чтобы записать нормальный закон распределения того или иного информативного параметра (x_i) в в классе K_1 или классе K_2 . Например, для признака x_1 в классе K_2 этот закон запишется как

$$w(x_1 / K_2) = \frac{1}{\sigma_1^{(K2)} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_1 - m_1^{(K2)})^2}{2\sigma_1^{(K2)2}}}. \quad (5.8)$$

Графическая иллюстрация распределений для признака x_1 представлена на рис. 5.11.

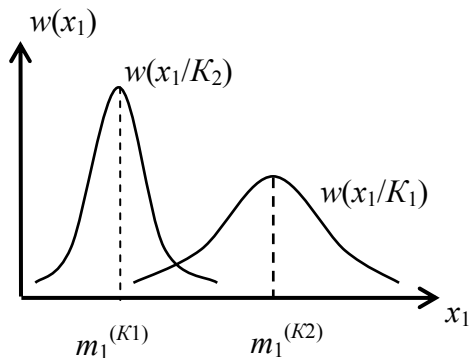


Рис. 5.11. Распределения информативного параметра в классах K_1 и K_2

Для определения значения $\lambda^{(j)}$ пользуются выражением (5.7). Если для какого-то нового экземпляра, обозначенного как l -й экземпляр, $\lambda^{(l)} > 1$, то по результатам прогнозирования этот экземпляр должен быть отнесен к классу K_1 . Если $\lambda^{(l)} < 1$, то l -й экземпляр должен быть отнесён к классу K_2 , т.е. прогнозирующее правило имеет вид

$$\lambda^{(l)} > 1, l \in K_1;$$

$$\lambda^{(l)} \leq 1, l \in K_2.$$

Замечено, что значение $\lambda^{(l)}$ изменяется в очень широком диапазоне, поэтому на практике во многих случаях пользуются не значением $\lambda^{(l)}$, а значением $\ln \lambda^{(l)} = L^{(l)}$. В этом случае прогнозирующее правило записывается в виде

$$l \in K_1, \text{ если } L^{(l)} > 0;$$

$$l \in K_2, \text{ если } L^{(l)} \leq 0.$$

Описанная процедура применения метода статистических решений был основана на двух предположениях:

1. Информативные параметры являются независимыми, следовательно, и некоррелированными (обратное – не верно).
2. Законы распределения признаков (информативных параметров) в классе K_1 и K_2 соответствуют нормальным.

Если принять во внимание корреляцию информативных параметров, то математический аппарат в методе статистических решений значительно усложняется и применение метода возможно лишь с использованием ЭВМ, т. к. приходится выполнять операции с матрицами.

В промышленности существуют руководящие документы, рекомендующие метод для использования применительно к изделиям электронной техники. Руководящие документы также предлагают пользователям соответствующее программное обеспечение.

5.14. Метод потенциальных функций

Является одним из методов индивидуального прогнозирования надёжности по информативным параметрам изделия. В этом методе используется такое нелинейное преобразование пространства информационных параметров, которое подчеркивает (усиливает) разделение классов.

В этом методе для нового l -го экземпляра определяют суммарный потенциал $\varphi_{l,\Sigma}$, наводимый на него всеми экземплярами, участвовавшими в обучающем эксперименте. Причём, считают, что экземпляры класса K_1 обучающей выборки наводят на новый экземпляр положительный, а экземпляры класса K_2 – отрицательный потенциал.

Прогнозирующее правило в этом методе записывается выражением

$$l \in K_1, \text{ если } \varphi_{l,\Sigma} > 0;$$

$$l \in K_2, \text{ если } \varphi_{l,\Sigma} \leq 0.$$

Графическая интерпретация метода понятна из рис. 5.12.

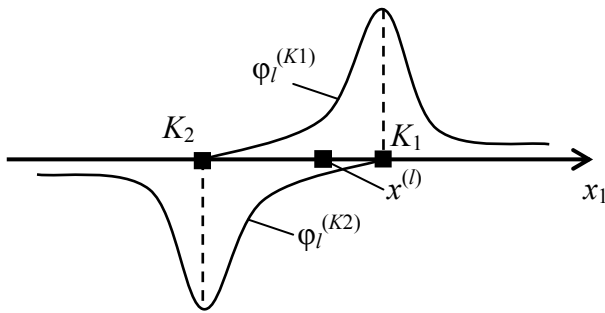


Рис. 5.12. К пояснению метода потенциальных функций:
 $\phi_l^{(K1)}$, $\phi_l^{(K2)}$ – потенциалы, наводимые на новый l -й экземпляр, соответственно экземпляром класса K_1 и класса K_2

Так как информативные параметры x_i , как правило, имеют разную размерность и изменяются в различных диапазонах, то при реализации метода пользуются нормированными значениями информативных параметров $x_{\text{норм } i}^{(j)}$, $i=1, \dots, k$; $j=1, 2, \dots, n$. Нормировку выполняют с использованием выражения

$$x_{\text{норм } i}^{(j)} = x_i^{(j)} / \sigma_i, \quad (5.9)$$

где $x_i^{(j)}$ – значение i -го информативного параметра для j -го экземпляра в размерности параметра x_i ;
 σ_i – среднеквадратическое отклонение i -го информативного параметра, посчитанное с использованием всех экземпляров обучающей выборки.

5.15. Метод дискриминантных функций

В этом методе строят линию (плоскость или поверхность), разделяющую экземпляры класса K_1 и K_2 , причём эту разделяющую линию или поверхность получают в линейном или нелинейном виде. Математическую функцию, описывающую линию (поверхность) и называют дискриминантной. Для её получения используются экземпляры классов K_1 и K_2 обучающей выборки. Во многих случаях дискриминантную функцию получают в линейном виде.

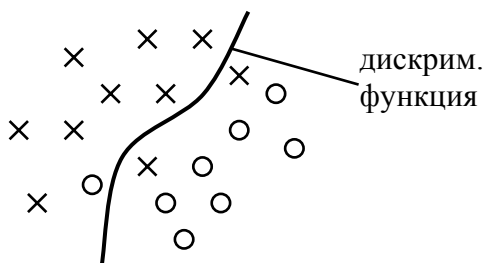


Рис. 5.13. Графическая интерпретация метода дискриминантных функций:
 x – экземпляры класс K_1 ,
 o – экземпляры класс K_2

Графическая интерпретация метода иллюстрируется рис. 5.13.

Недостаток метода: сложность получения разделяющей функции при большом числе информативных параметров ($k \geq 3$), особенно в случаях нелинейности этой функции.

5.16. Метод пороговой логики

В ранее рассмотренных методах для решения задачи индивидуального прогнозирования использовались непрерывные отсчёты информативных параметров. Такие отсчёты являются избыточными для принятия решения о классе экземпляра.

В методе пороговой логики непрерывные отсчёты информативных параметров преобразуются в двоичный код (числа «0» и «1») и в дальнейшем оперируют значениями двоичных чисел. В итоге прогнозирующее правило может быть представлено простой логической таблицей, показывающей, какой комбинации двоичных чисел соответствует тот или иной класс экземпляра (примером является табл. 5.3). Количество строк таблицы не превышает числа $T=2^k$, где k – число информативных параметров, следовательно, и двоичных сигналов.

Таблица 5.3

Прогнозирующее правило в виде логической таблицы

Номер комбинации двоичных чисел	Двоичное число, соответствующее x_i				Прогнозируемый класс экземпляра
	x_1	x_2		x_k	
1	1	1		1	K_1
2	0	0		1	K_1
3	0	0	...	1	K_2
...
T	0	0		0	K_2

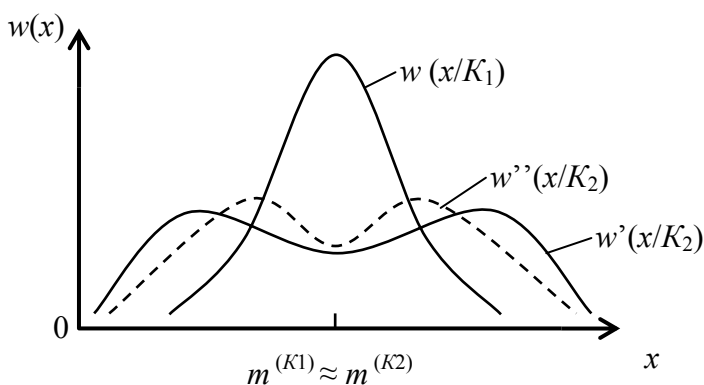


Рис. 5.14. Иллюстрация эффекта вложенности классов

Нетрудно понять, что ошибки прогнозирования определяются областью перекрытия классов по каждому информативному параметру. Недостатком метода является то, что он не может работать с информативными параметрами, для которых имеет место эффект вложенности классов (рис. 5.14). Экспериментально замечено, что в

этом случае средние значения информативного параметра в классах K_1 и K_2 примерно совпадают (см. рис.5.14).

5.17. Общая характеристика методов повышения надёжности РЭС на этапе эксплуатации

Основными методами на этом этапе являются:

1. Строгое соблюдение установленных правил эксплуатации.
2. Своевременное выполнение профилактического осмотра и планового технического обслуживания, предусмотренных технической документацией.
3. Предсказание постепенных отказов методами прогнозирования экстраполяцией параметра и заблаговременная замена устройств, у которых может возникнуть постепенный отказ.

5.18. Прогнозирование постепенных отказов методом экстраполяции (случай однопараметрических устройств)

Если функция, возлагаемая на РЭУ, в основном определяется одним выходным параметром, то проблем с прогнозированием постепенного отказа для этих РЭУ не существует, так как для них можно использовать обратное прогнозирование методом экстраполяции параметра (рис. 5.15).

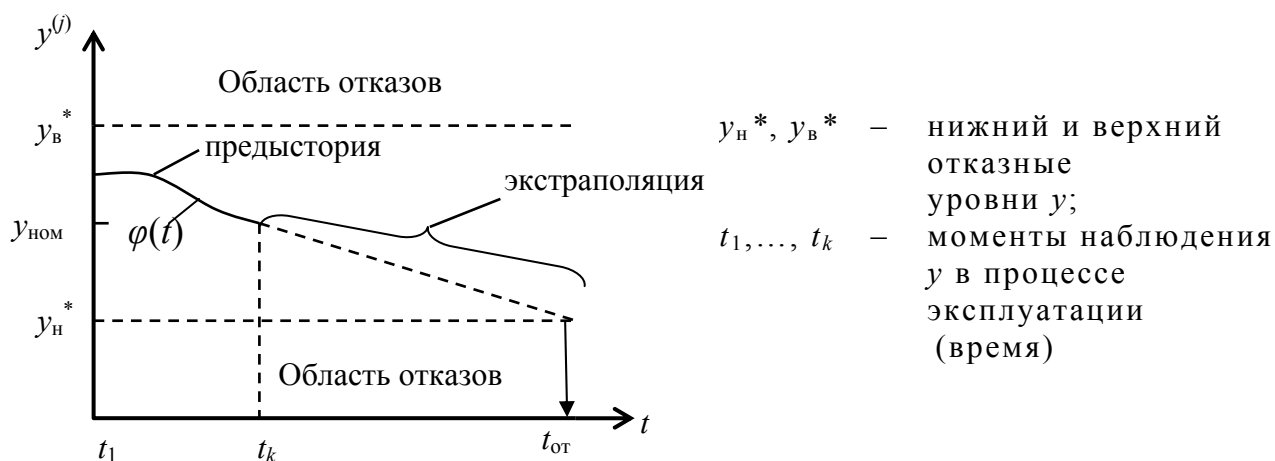


Рис. 5.15. Обратное прогнозирование методом экстраполяции па-

При таком прогнозировании определяют время $t_{от}$, при котором функциональный параметр j -го экземпляра $y^{(j)}$ достигнет нижнего или верхнего отказного уровня. Замену экземпляра (РЭУ) нужно производить не в момент $t_{от}$, а заблаговременно в момент времени $t_{зам}$. Для этого можно найти нижнюю доверительную границу $t_{от}^{(H)}$ для времени $t_{от}$.

$$t_{зам} = t_{от}^{(H)}.$$

5.19. Прогнозирование работоспособности многопараметрических устройств

На практике во многих случаях работоспособность РЭУ определяют не одним, а несколькими функциональными (выходными) параметрами. В процессе эксплуатации РЭУ эти функциональные параметры изменяются, причём каждый по-разному. Возникает вопрос, как прогнозировать работоспособность таких устройств.

С точки зрения потери работоспособности для таких устройств можно выделить два случая:

1. Потеря работоспособности (отказ) РЭУ возникает при достижении нижнего или верхнего отказного уровня хотя бы одним из функциональных параметров (наиболее характерный случай).

2. Потеря работоспособности (отказ) происходит в случае достижения отказного уровня последним из оставшихся функциональных параметров.

Применительно к первому случаю ответ на интересующий вопрос можно получить, решив для каждого из функциональных параметров задачу обратного прогнозирования, используя метод экстраполяции параметра. Как принимается решение о времени отказа РЭУ в целом – понятно из рис. 5.16.

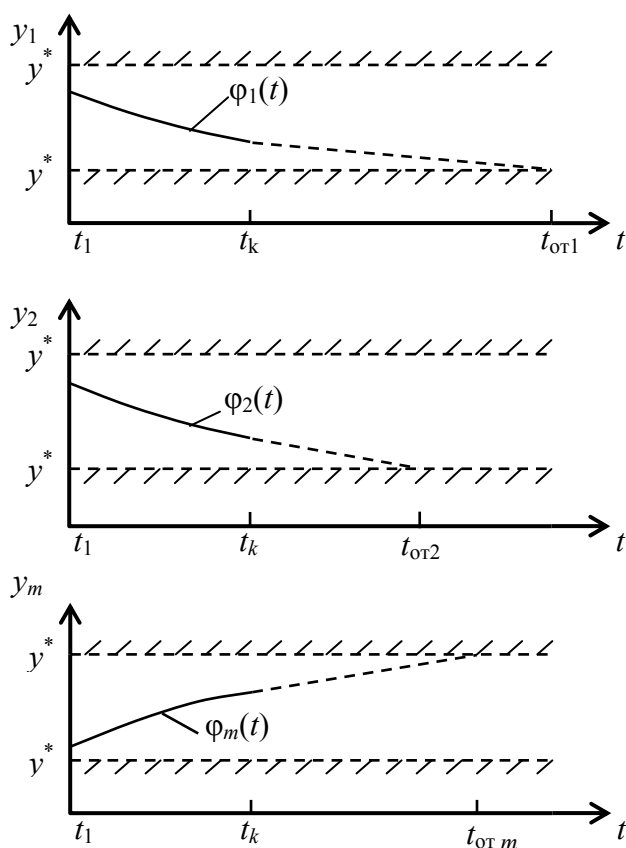


Рис. 5.16. Обратное прогнозирование методом экстраполяции m параметров

На рисунке приняты такие обозначения:

- y^* — нижний и верхний отказные уровни функциональных параметров;
- $\varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)$ — математические модели прогнозирования для функциональных параметров y_1, \dots, y_m ;
- t_1, \dots, t_k — моменты времени наблюдения функциональных параметров y_1, \dots, y_m при эксплуатации РЭУ;
- $t_{отj}$ — прогнозируемое время отказа РЭУ по j -му функциональному параметру.

Из рис. 5.16 видно, что в данном примере

$$t_{от \text{ РЭУ}} = \min \{t_{от1}, t_{от2}, \dots, t_{от m}\} = t_{от2}.$$