

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

С. М. БОРОВИКОВ, И. Н. ЦЫРЕЛЬЧУК, Ф. Д. ТРОЯН

РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Рекомендовано УМО вузов Республики Беларусь
по образованию в области информатики и радиоэлектроники
в качестве учебно-методического пособия для студентов учреждений,
обеспечивающих получение высшего образования по специальностям
«Моделирование и компьютерное проектирование РЭС»
и «Проектирование и производство РЭС»*

Под редакцией С.М. Боровикова

Минск БГУИР 2010

УДК 621.396.6(075.8)

ББК 32.844я73

Б83

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра радиоэлектроники Минского государственного
высшего радиотехнического колледжа (заведующий кафедрой
кандидат технических наук, доцент И. И. Шпак);
генеральный директор научно-производственного объединения «Интеграл»,
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук,
профессор В. А. Емельянов

Боровиков, С. М.

Б83

Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств :
учеб.-метод. пособие / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян ; под
ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2010. – 68 с. : ил.

ISBN 978-985-488-480-6

Рассмотрены основы теории надёжности изделий радиоэлектроники и методы
оценки показателей надёжности проектируемых устройств. Приводятся математиче-
ские модели прогнозирования эксплуатационной безотказности элементов отече-
ственного (страны СНГ) и иностранного производства. Даются рекомендации по рас-
чёту показателей надёжности РЭУ в курсовых и дипломных проектах, делается ори-
ентация на использование прикладного программного комплекса по расчёту надёж-
ности – учебной системы АРИОН.

УДК 621.396.6(075.8)

ББК 32.844я73

ISBN 978-985-488-480-6

© Боровиков С. М., Цырельчук И. Н.,
Троян Ф. Д., 2010

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2010

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ.....	6
1.1. Надёжность как свойство РЭУ и элементов.....	6
1.2. Классификация отказов.....	6
1.3. Математическое описание отказов.....	7
2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ РЭА И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	7
2.1. Общая характеристика показателей надёжности.....	7
2.2. Единичные показатели безотказности и ремонтпригодности.....	9
3. НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ.....	12
3.1. Интенсивность отказов как основная характеристика безотказности элементов.....	12
3.2. Коэффициент электрической нагрузки элементов.....	12
3.3. Учёт влияния электрического режима и условий работы.....	14
4. РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ РЭУ.....	14
4.1. Основные расчётные соотношения.....	14
4.2. Методы расчёта показателей надёжности.....	15
5. МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОИЗВОДСТВА СТРАН СНГ.....	17
5.1. Общая характеристика моделей.....	17
5.2. Интегральные микросхемы.....	24
5.3. Полупроводниковые приборы.....	26
5.4. Оптоэлектронные элементы.....	27
5.5. Конденсаторы.....	28
5.6. Резисторы.....	29
5.7. Элементы коммутации.....	30
5.8. Соединители (разъёмы).....	31
5.9. Знакосинтезирующие индикаторы.....	31
5.10. Трансформаторы.....	32
5.11. Прочие элементы и компоненты.....	32
5.12. Значения коэффициента $K_{Э}$	35
5.13. Значения коэффициента $K_{П}$	37
6. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНОСТРАННОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	39
6.1. Общая характеристика моделей и описание их коэффициентов.....	39
6.2. Интегральные микросхемы.....	41
6.3. Полупроводниковые приборы.....	46
6.4. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы.....	51
6.5. Резисторы.....	53
6.6. Конденсаторы.....	55
6.7. Выбор значений коэффициента K_E	57
7. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ РЭУ В КУРСОВЫХ И ДИПЛОМНЫХ ПРОЕКТАХ.....	58
7.1. Требования к показателям безотказности и ремонтпригодности.....	58
7.2. Последовательность выполнения расчёта показателей безотказности.....	60
7.3. Пример расчёта показателей безотказности РЭУ.....	63
7.4. Использование учебной системы автоматизированного расчёта надёжности для определения показателей безотказности РЭУ.....	67
Литература.....	68

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ *

- БИС – большая интегральная схема
ИМС – интегральная микросхема
ИС – интегральная схема
КМОП – структура на комплементарных МОП-транзисторах
МОП – структура «металл – окисел – полупроводник»
НИР – научно-исследовательская работа
ОЗУ – оперативное запоминающее устройство
ОКР – опытно-конструкторская работа
ПЗУ – постоянное запоминающее устройство
ПЛИС – программируемые логические интегральные схемы
ППЗУ – программируемое ПЗУ
ППП – полупроводниковый прибор
РПЗУ – перепрограммируемое (репрограммируемое) ПЗУ
РЭА – радиоэлектронная аппаратура
РЭС – радиоэлектронное средство
РЭУ – радиоэлектронное устройство
РЭФУ – радиоэлектронный функциональный узел
СБИС – сверхбольшая интегральная схема
СВЧ – сверхвысокая частота
ТЗ – техническое задание
ТТ – технические требования
ТУ – технические условия
ЭРИ – электрорадиоизделие
Chip Carrier – корпус с расположенными на его нижней части контактами, предназначенный для поверхностного монтажа
CMOS – Complement Metal Oxide Semiconductor (комплементарная структура металл – окисел – полупроводник, русскоязычная аббревиатура – КМОП)
DIP – Dual In-line Package (корпус с двумя рядами прямоугольных выводов – ДИП-корпус, представляет собой прямоугольный корпус с расположенными на длинных сторонах контактами. Его также называют корпусом второго типа. В зависимости от материала корпуса выделяют два варианта исполнения: *PDIP* – Plastic DIP, имеет пластиковый корпус; *CDIP* – Ceramic DIP, имеет керамический корпус)
Flat Package – корпус с планарными выводами
JFET – Junction Field-Effect Transistor (полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом, работающий в режиме обогащения)
PGA – Pin Grid Array (тип корпуса, в котором контактные штыри размещены на дне в виде концентрических квадратов)
PLA – Programmable Logic Array (программируемые логические матрицы – ПЛМ, программируемые логические интегральные схемы – ПЛИС)
MESFET – Metallized Semiconductor Field-Effect Transistor (полевой транзистор структуры ММП, полевой транзистор с барьером Шоттки)
MOSFET – Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (канальный полевой униполярный МОП-транзистор)
SMD – Surface Mount Device (СМД – элементы поверхностного монтажа)
SMT – Surface Mount Technology (технология поверхностного монтажа)
QML – Qualified Manufactures List (перечень аттестованных производителей)
QPL – Qualified Products List (перечень аттестованной продукции)

* В зависимости от контекста приведённые сокращения могут использоваться в единственном и во множественном числе.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка показателей надёжности радиоэлектронных устройств (РЭУ) является обязательной процедурой, выполняемой на этапе проектирования аппаратуры. Актуальность задач по расчёту надёжности объясняется тем, что они дают ответ на вопрос о целесообразности дальнейших затрат, необходимых на отработку технологии и производство радиоэлектронных устройств. Поэтому в заданиях на дипломное проектирование проектов конструкторского и технологического профиля включают проработку вопросов по оценке показателей надёжности РЭУ.

Учебные планы специальностей «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств» и «Проектирование и производство радиоэлектронных средств» включают дисциплину, предусматривающую изучение основ теории и методов оценки показателей надёжности РЭУ. Полученные навыки и умения студентов в вопросах надёжности изделий радиоэлектроники будут востребованы в полной мере в дипломном проектировании.

В настоящее время проектные и промышленные предприятия испытывают трудности при расчёте показателей надёжности РЭУ из-за неполноты данных о показателях надёжности элементов производства стран СНГ, отсутствия данных об элементах зарубежного производства, входящих в состав электронных устройств, а также из-за отсутствия адаптированной к этим условиям системы автоматизированного расчёта показателей надёжности устройств. Наличие такой системы позволит существенно сократить время решения задачи по оценке надёжности электронных устройств в указанных условиях.

Пособие содержит учебный материал по оценке показателей безотказности РЭУ как важнейшей группы количественных показателей надёжности. Основу расчёта показателей безотказности РЭУ составляют математические модели расчёта (прогнозирования) эксплуатационной безотказности элементов. Доля элементов из стран дальнего зарубежья в аппаратуре отечественного производства составляет более 50 %, поэтому авторы сочли целесообразным включить в пособие модели прогнозирования эксплуатационной безотказности элементов производства как стран СНГ, так и стран дальнего зарубежья. При уточнении и описании моделей использованы справочники по надёжности, разработанные в Российской Федерации, справочники и стандарты по прогнозированию надёжности электронного оборудования, используемые в настоящее время в США, Китае, Франции и Великобритании.

При систематизации методики расчёта показателей безотказности РЭУ использованы результаты НИР по разработке промышленной системы автоматизированного расчёта и оптимизации надёжности электронных устройств – АРИОН, выполняемой кафедрой радиоэлектронных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

С учётом учебного характера пособия в нём также излагаются некоторые положения теории надёжности и принципы расчёта эксплуатационной интенсивности отказов элементов и оценки показателей безотказности РЭУ в целом.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ НАДЁЖНОСТИ

1.1. Надёжность как свойство РЭУ и элементов

Под *надёжностью* понимают свойство изделия сохранять в течение заданного времени в пределах установленных норм значения функциональных параметров при определённых условиях (заданные режимы и условия эксплуатации, технического обслуживания, хранения и транспортирования).

В теории и практике надёжности технических изделий широко пользуются понятием *наработка*, под которой понимают продолжительность работы изделия, выраженную в часах, циклах переключения или других единиц в зависимости от вида и функционального назначения изделия.

Под *отказом* понимают полную или частичную потерю изделием работоспособности вследствие ухода одного или нескольких функциональных параметров за пределы установленных норм, указанных в технической документации.

Под *наработкой до отказа* понимают суммарную наработку изделия от момента вступления в работу (эксплуатацию) до возникновения первого отказа.

Надёжность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения изделия и условий его применения может включать *безотказность*, *долговечность*, *ремонтпригодность* и *сохраняемость* или определенные сочетания этих свойств.

Многие понятия и определения теории надёжности базируются на таких понятиях, как работоспособность и безотказность [1, 2, 4].

Безотказность – свойство изделия непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Для осмысливания других составляющих надёжности (ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость), а также понятий ресурс и срок службы, с помощью которых судят о долговечности, рекомендуем обратиться к работам [1, 2, 4].

1.2. Классификация отказов

В настоящее время существуют различные схемы классификации отказов. Одна из схем представлена в табл. 1.1 [1].

Внезапный отказ (ранее называемый также мгновенным) – это отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значения одного или нескольких параметров изделия. Этот отказ обычно приводит к полной потере работоспособности изделия.

Под *постепенным* (ранее называемым также параметрическим) понимают отказ, возникающий в результате постепенного, обычно непрерывного и монотонного изменения значения одного или нескольких функциональных параметров изделия и ухода их за пределы норм, указанных в технической документации. С определением других видов отказов можно ознакомиться в [1, 2, 4].

Примерное распределение числа отказов РЭА: отказы из-за ошибок проектирования – 40...50 %, отказы из-за ошибок производства – 30...40 %, отказы из-за неправильных действий оператора – 20...30 %.

Замечено, что в 75...80 % случаев различные причины отказов дают о себе знать в виде отказа элементов. Это накладывает заметный психологический отпечаток на потребителей относительно истинных причин отказов.

1.3. Математическое описание отказов

По своей физической сущности отказы элементов и устройств являются событиями случайными. Поэтому для количественного описания отказов пригодны приёмы теории вероятностей [1, 4].

Анализируя отказы, нетрудно установить, что случайной величиной, описывающей отказы, является время до отказа (в общем случае наработка до отказа).

В настоящее время в отечественной и мировой практике в 95...99 % случаев пользуются предположением об экспоненциальном распределении времени до отказа элементов, при котором плотность распределения времени до отказа задаётся выражением

$$w(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \lambda > 0, t \geq 0, \quad (1.1)$$

где λ – параметр распределения для рассматриваемого элемента, численно равный его интенсивности отказов.

Характеристика $w(t)$ на практике не находит широкого применения в качестве показателя надёжности изделий, однако она используется для определения показателей безотказности.

2. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЁЖНОСТИ РЭА И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

2.1. Общая характеристика показателей надёжности

Надёжность является комплексным свойством изделия. Для описания различных сторон этого свойства на практике пользуются *показателями надёжности*, представляющими собой количественные характеристики одного или нескольких свойств, определяющих надёжность изделия.

На практике используют пять групп показателей: показатели безотказности; показатели ремонтпригодности; показатели долговечности; показатели сохраняемости; комплексные показатели надёжности. Все показатели, кроме комплексных, относят к единичным показателям. Под *единичным* понимают такой показатель, который характеризует одно из свойств, составляющих надёжность изделия: или безотказность, или ремонтпригодность и т. д.

Таблица 1.1
Классификация отказов РЭУ и их элементов

Классификационный признак	Вид отказа
Характер возникновения отказа	Внезапный Постепенный
Время существования отказа	Постоянный Временный Перебегающий (временные отказы, следующие один за другим)
Характер проявления отказа	Явный Неявный
Зависимость отказов между собой	Зависимый Независимый
Причина возникновения отказа	Конструктивный Производственный Эксплуатационный Деградационный

Комплексный показатель характеризует несколько свойств из числа, составляющих надёжность изделия (два и более свойств).

Основные единичные показатели надёжности, используемые в инженерной практике, указаны на рис. 2.1. Они записаны с помощью своих условных обозначений, пояснение которых приведено в табл. 2.1.

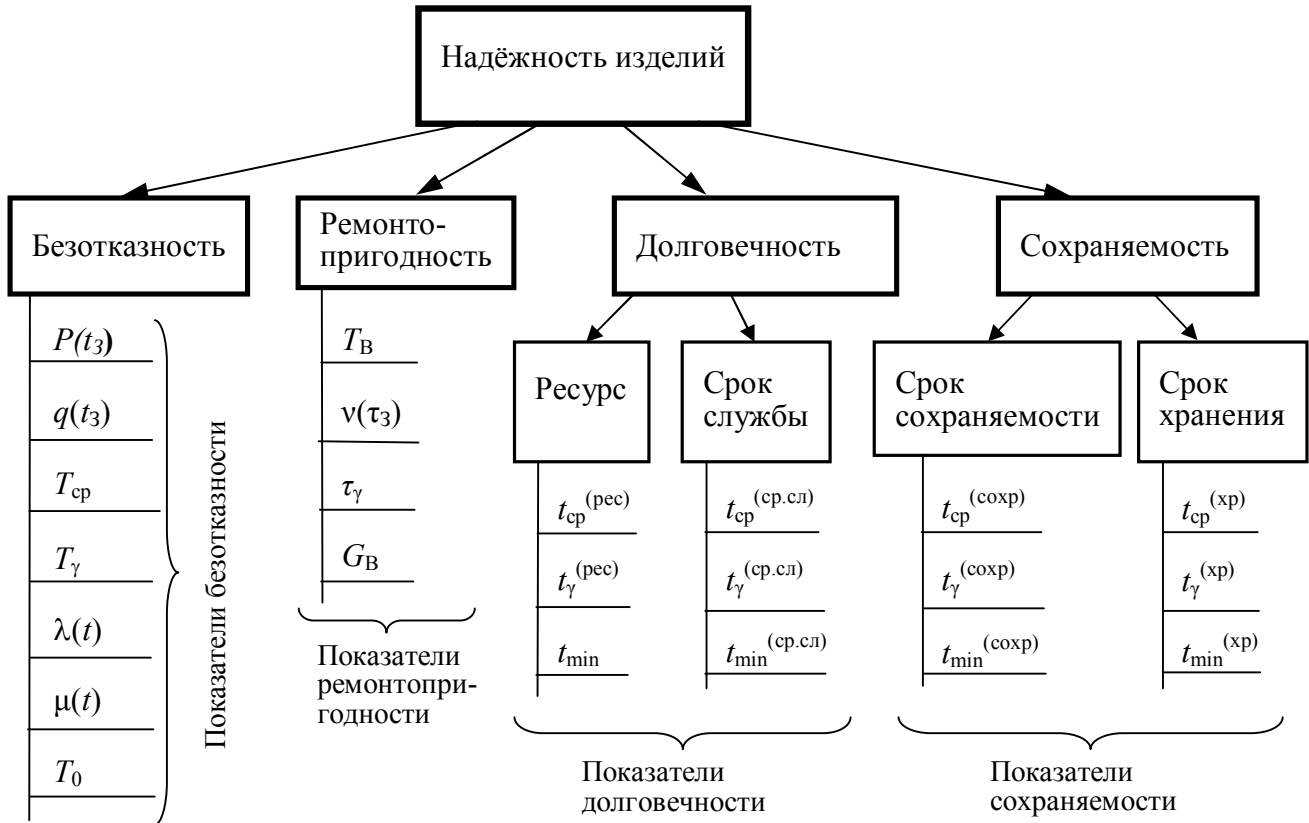


Рис. 2.1. Основные составляющие и показатели надёжности

Таблица 2.1

Пояснения показателей надёжности

Обозначение показателя	Пояснение показателя надёжности
Показатели безотказности	
$P(t_3)$	Вероятность безотказной работы за заданное (интересующее) время t_3
$q(t_3)$	Вероятность отказа за заданное время t_3
T_{cp}	Средняя наработка до отказа. Если наработка выражается временем, то показатель называют средним временем безотказной работы
T_γ	Гамма-процентная наработка до отказа (обычно $\gamma \geq 90\%$)
$\lambda(t)$	Интенсивность отказов, в общем случае является функцией времени. Используется в качестве основной справочной характеристики безотказности элементов, причём принимается $\lambda(t) = \lambda_0 = \text{const}$ при наработке, равной t_H (указывается конкретное значение t_H в часах)
T_0	Средняя наработка на отказ, кратко – наработка на отказ. Имеет физический смысл только для восстанавливаемых РЭУ

Обозначение показателя	Пояснение показателя надёжности
Показатели ремонтпригодности	
T_B	Среднее время восстановления РЭУ. Представляет математическое ожидание времени восстановления
$v(\tau_3)$	Вероятность восстановления РЭУ за заданное время τ_3
τ_γ	Гамма-процентное время восстановления (обычно $\gamma \geq 90\%$)
G_B	Средние затраты на восстановление РЭУ. Показывает, сколько в среднем потребуется денежных средств на восстановление работоспособности РЭУ
Показатели долговечности	
$t_{cp}^{(pec)}$	Средний ресурс изделия. Представляет собой математическое ожидание ресурса изделий рассматриваемого типа
$t_\gamma^{(pec)}$	Гамма-процентный ресурс (обычно $\gamma \geq 90\%$)
t_{min}	Минимальная наработка. Характеризует ресурсные возможности изделия, считают, что t_{min} соответствует значению $t_\gamma^{(pec)}$ при $\gamma = 99,99\%$
$t_{cp}^{(cp.сл)}$	Средний срок службы изделия. Представляет собой математическое ожидание срока службы изделий рассматриваемого типа
$t_\gamma^{(cp.сл)}$	Гамма-процентный срок службы (обычно $\gamma \geq 90\%$)
$t_{min}^{(cp.сл)}$	Минимальный срок службы. Считают, что $t_{min}^{(cp.сл)}$ соответствует гамма-процентному сроку службы $t_\gamma^{(cp.сл)}$ при $\gamma = 99,99\%$
Показатели сохраняемости	
$t_{cp}^{(соxp)}$	Средний срок сохраняемости изделия. Представляет собой математическое ожидание срока сохраняемости изделий рассматриваемого типа
$t_\gamma^{(соxp)}$	Гамма-процентный срок сохраняемости (обычно $\gamma \geq 90\%$)
$t_{min}^{(соxp)}$	Минимальный срок сохраняемости. Считают, что $t_{min}^{(соxp)}$ соответствует значению $t_\gamma^{(соxp)}$ при $\gamma = 99,99\%$
$t_{cp}^{(xp)}$	Средний срок хранения изделия. Представляет собой математическое ожидание срока хранения изделий рассматриваемого типа
$t_\gamma^{(xp)}$	Гамма-процентный срок хранения (обычно $\gamma \geq 90\%$)
$t_{min}^{(xp)}$	Минимальный срок хранения. Считают, что $t_{min}^{(xp)}$ соответствует гамма-процентному сроку хранения $t_\gamma^{(xp)}$ при $\gamma = 99,99\%$

2.2. Единичные показатели безотказности и ремонтпригодности

Вероятность безотказной работы. Под вероятностью безотказной работы изделия за время t_3 понимают вероятность вида

$$P(t_3) = \text{Вер} \{T \geq t_3\}, \quad (2.1)$$

где T – случайное время безотказной работы изделия (время до отказа).

Если известна функция плотности распределения времени до отказа $w(t)$, то вероятность безотказной работы изделия за время t_3 может быть определена как

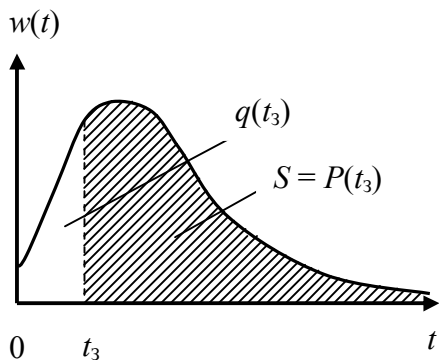


Рис. 2.2. К определению вероятностей $P(t_3)$ и $q(t_3)$

$$P(t_3) = \int_{t_3}^{\infty} w(t) dt . \quad (2.2)$$

Геометрическая интерпретация выражения (2.2) понятна из рис. 2.2.

В случае экспоненциального распределения времени до отказа с использованием выражения (2.2) можно получить

$$P(t_3) = e^{-\lambda t_3} , \quad (2.3)$$

где λ – параметр экспоненциального распределения для рассматриваемого изделия.

Формулой (2.3) широко пользуются в инженерных расчётах. Она также известна под названием *экспоненциальный закон надёжности*.

Интенсивность отказов. Под интенсивностью отказов элементов для интервала времени Δt_i понимают значение условной плотности распределения времени до отказа при условии, что к началу рассматриваемого момента времени Δt_i отказов не было. С использованием результатов испытаний *интенсивность отказов* численно можно определить как

$$\lambda_i^* = \frac{n(\Delta t_i)}{N_{\text{ср } i} \cdot \Delta t_i} , \quad (2.4)$$

где $n(\Delta t_i)$ – количество элементов, отказавших в i -м временном интервале;

$N_{\text{ср } i}$ – среднее количество элементов, безотказно работавших в i -м временном интервале;

Δt_i – ширина i -го временного интервала.

Среднее время безотказной работы. Надёжность однотипных РЭУ или элементов с точки зрения продолжительности их работы до первого отказа характеризуют *средним временем безотказной работы*, под которым понимают математическое ожидание времени безотказной работы. В общем случае рассматриваемый показатель называют *средней наработкой до отказа*, так как он представляет собой математическое ожидание (среднее значение) случайной величины – наработки до отказа. Этот показатель может использоваться для любых изделий: восстанавливаемых и невосстанавливаемых.

Гамма-процентная наработка до отказа. Под ней понимают наработку, в течение которой отказ в изделии не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах. Запись в технической документации: «90-процентная наработка до отказа составляет не менее 500 ч» означает, что у 90 % изделий данного вида в течение суммарной наработки, равной 500 ч, отказ не возникнет.

Наработка на отказ (средняя наработка на отказ). На временной оси изобразим процессы функционирования и устранения отказов РЭУ (одного экземпляра) в течение некоторого календарного периода (рис. 2.3).

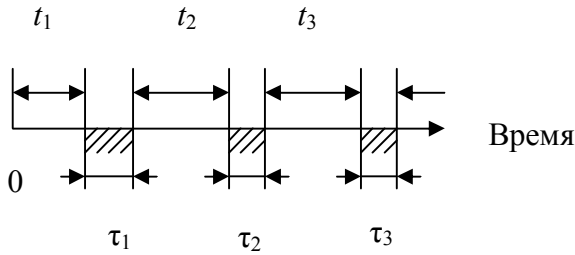


Рис. 2.3. Процесс функционирования РЭУ:
 t_1, t_2, t_3 – интервалы безотказной работы РЭУ;
 τ_1, τ_2, τ_3 – интервалы по устранению отказов

Тогда наработку на отказ T_0 можно определить как

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m}, \quad (2.5)$$

где m – число отказов РЭУ, возникших за рассмотренный календарный период, или, что то же самое, число периодов безотказной работы.

Показатель T_0 имеет физический смысл только для восстанавливаемых устройств. Его более полно называют *средней наработкой на отказ*, что понятно из выражения (2.5).

Показатели T_0 и T_{cp} по своей физической сущности различны, однако в случае *экспоненциального* распределения времени до отказа они *совпадают по значению* и соответствуют примерно 37 %-й наработке до отказа ($\gamma \approx 37\%$). Это означает, что примерно 37 % РЭУ данного вида проработают без отказа в течение времени $t \geq T_0$. Можно также показать, что при экспоненциальном распределении времени до отказа справедливы соотношения [11]:

$$T_{\gamma=90\%} \approx 0,1T_0; \quad T_{\gamma=99\%} \approx 0,01T_0; \quad T_{\gamma=99,9\%} \approx 0,001T_0. \quad (2.6)$$

Вероятность восстановления РЭУ. Под вероятностью восстановления устройства за заданное время τ_3 понимают вероятность вида

$$v(\tau_3) = \text{Вер}\{T \leq \tau_3\}, \quad (2.7)$$

где T – случайное время восстановления устройства.

Формулы расчёта значений вероятности $v(\tau_3)$ зависят от закона распределения времени восстановления. Обычно пользуются гипотезой об экспоненциальном распределении времени восстановления. В этом случае расчётная формула имеет вид

$$v(\tau_3) = 1 - e^{-\tau_3/T_B}, \quad (2.8)$$

где T_B – среднее время восстановления.

Среднее время восстановления. Под ним понимают математическое ожидание времени восстановления работоспособного состояния РЭУ после отказа. Среднее время восстановления определяется по аналогии с показателем T_0 (см. рис. 2.3):

$$T_B = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^m \tau_i \right). \quad (2.9)$$

Значение T_B показывает, сколько в среднем затрачивается времени на обнаружение и устранение одного отказа. Затраты времени, связанные с решением организационных вопросов, поиском и доставкой нужных элементов и т. п., во время T_B не входят.

Пояснение других показателей надёжности приводится в [1, 2, 4].

3. НАДЁЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

3.1. Интенсивность отказов как основная характеристика безотказности элементов

При расчёте показателей надёжности устройств необходимо располагать справочными данными о показателях надёжности элементов.

В настоящее время основной справочной *характеристикой безотказности элементов*, приводимой в технических условиях или других технических документах, является интенсивность отказов λ_0 . Значение λ_0 принимается постоянным в течение определённой наработки, также указываемой в технической документации, и соответствует номинальному электрическому режиму и нормальным (лабораторным) условиям эксплуатации, если явно не указано иное. Ранее (примерно до 80-х годов прошлого века) приводимые значения λ_0 характеризовали безотказность элементов с точки зрения лишь внезапных отказов. В настоящее время значения λ_0 , приводимые в технической документации и справочниках по надёжности, характеризуют безотказность элементов с учётом как внезапных, так и постепенных отказов [10–12]. Обоснование выбора λ_0 в качестве основной справочной характеристики безотказности элементов приводится в [1].

Размерность интенсивности отказов: $[\lambda] = 1/\text{ч} = \text{ч}^{-1}$.

Справочные значения λ_0 современных элементов занимают диапазон примерно $10^{-10} \dots 10^{-5}$ 1/ч.

За рубежом для высоконадёжных элементов радиоэлектроники в качестве размерности λ стали использовать фит: 1 фит = 10^{-9} 1/ч.

3.2. Коэффициент электрической нагрузки элементов

Реальный уровень безотказности элементов зависит от коэффициентов их электрической нагрузки, определяемых отношением

$$K_H = \frac{F_{\text{раб}}}{F_{\text{ном}}}, \quad (3.1)$$

где $F_{\text{раб}}$ – электрическая нагрузка элемента в рабочем режиме, т. е. фактическая нагрузка на рассматриваемом схемном элементе;

$F_{\text{ном}}$ – номинальная или предельная по ТУ электрическая нагрузка элемента, выполняющего в конструкции функцию схемного элемента.

В качестве F выбирают такую электрическую характеристику элемента, которая в наибольшей степени влияет на его безотказность (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Электрические характеристики, используемые для определения K_H

Группа элементов	Характеристика F	Группа элементов	Характеристика F
1. Резисторы	Рассеиваемая мощность	7. Тиристоры	Средний прямой ток, рассеиваемая мощность
2. Конденсаторы	Прикладываемое напряжение	8. Трансформаторы	Мощность
3. Варикапы подстроечные. Транзисторы, транзисторные сборки. Диоды СВЧ	Рассеиваемая мощность	9. Дроссели, катушки индуктивности	Ток подмагничивания или протекающий ток
4. Диоды, кроме стабилитронов, диодные сборки	Средний прямой ток	10. Реле	Коммутируемый ток
5. Полупроводниковые (ПП) знаковосинтезирующие индикаторы, оптопары, ПП излучатели	Средний прямой ток	11. Соединители (разъёмы), элементы коммутации (переключатели, тумблеры, кнопки и т.п.)	Протекающий ток
6. Стабилитроны	Ток стабилизации, рассеиваемая мощность	12. Кабели, шнуры, монтажные провода	Плотность тока в проводе

Недопустимо использовать элементы с коэффициентом электрической нагрузки $K_H > 1$ даже по одному из параметров электрического режима. Считают [1], что для типовых элементов РЭС оптимальные значения коэффициентов нагрузки $K_{H, \text{опт}} \approx 0,2 \dots 0,6$.

Понятием коэффициент нагрузки ИМС на практике прямо не пользуются. Каждая ИС включает определённое количество элементов, коэффициенты электрической нагрузки которых определяются внутренней структурой (электрической схемой) и конструктивно-технологическими особенностями изготовления ИМС. Значения коэффициентов нагрузки элементов учтены справочным значением интенсивности отказов λ_0 ИМС в целом. Приводимые λ_0 соответствуют условиям типовой (усреднённой) электрической нагрузки ИМС и температуре окружающей среды $t = +25^\circ\text{C}$. Однако в ряде случаев некоторые группы (типы) ИМС допускают работу в облегчённых режимах, нежели типовые, например использование аналоговых ИМС при пониженном напряжении питания, что повышает их эксплуатационную безотказность. Повышение эксплуатационной безотказности (уменьшение эксплуатационной интенсивности отказов) ИМС, используемых в облегчённых режимах, может быть учтено с помощью коэффициента $K_{\text{обл}}$, представляющего отношение рабочей электрической нагрузки к максимально допустимой (номинальной). В этом случае коэффициент $K_{\text{обл}}$ может рассматриваться как некий аналог коэффициента нагрузки K_H ИМС в целом.

3.3. Учёт влияния электрического режима и условий работы

На практике с целью повышения надёжности РЭУ коэффициенты нагрузки элементов K_n выбирают меньше единицы. Условия работы элементов, как правило, оказываются более жёсткими, нежели нормальные. Возникает задача определения интенсивности отказов, соответствующей эксплуатационным факторам (электрическому режиму, условиям работы элемента в составе РЭУ, а также конструктивно-технологическим особенностям элемента). Эту интенсивность отказов называют эксплуатационной, будем обозначать её как $\lambda_э$.

В настоящее время в отечественной и мировой инженерной практике для определения $\lambda_э$ широко используют математическую модель вида

$$\lambda_э = \lambda_0 \prod_{i=1}^m K_i, \quad (3.2)$$

где m – количество факторов, принятых во внимание из числа влияющих на безотказность элементов;

K_i – поправочный коэффициент, учитывающий влияние i -го фактора.

В качестве факторов рассматриваются коэффициент нагрузки K_n , температура, степень жёсткости условий эксплуатации, характер электрического режима, функциональное назначение элемента в схеме, номинальное значение параметра элемента и др. Для РЭУ, работающих в обычных, неспецифических условиях, в ряде случаев принимают во внимание три важнейших фактора, влияющих на значение $\lambda_э$ элемента: коэффициент нагрузки K_n , температуру и степень жёсткости условий эксплуатации. По результатам экспериментальных исследований получены математические модели и составлены справочные таблицы для определения поправочного коэффициента, учитывающего совместное влияние K_n и температуры. Его называют коэффициентом режима K_p . Значение коэффициента эксплуатации $K_э$, учитывающего степень жёсткости условий эксплуатации (кроме температуры), показывает, во сколько раз интенсивность отказов элементов в составе РЭУ конкретной группы выше, чем в аппаратуре, работающей в стационарных лабораторных условиях.

4. РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ РЭУ

4.1. Основные расчётные соотношения

При проектировании РЭУ всегда рассчитывают показатели безотказности и показатели ремонтпригодности (если по техническому заданию РЭУ относится к восстанавливаемым изделиям).

Основное расчётное соотношение для вероятности безотказной работы устройства получают в предположении, что элементы электрической схемы РЭУ с точки зрения надёжности соединены последовательно. Эта модель надёжности РЭУ иллюстрируется рис. 4.1 и означает, что отказ РЭУ в целом происходит при отказе хотя бы одного из элементов.

С учётом принятой модели надёжности РЭУ и гипотезы об экспоненциальном законе надёжности элементов вероятность безотказной работы РЭУ $P_{\Sigma}(t_3)$ за заданное время t_3 находят, используя выражение

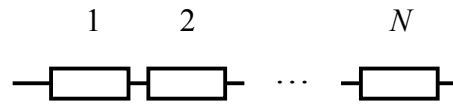


Рис. 4.1. Схема (модель) соединения элементов в РЭУ с точки зрения надёжности:
 N – количество элементов в РЭУ

$$P_{\Sigma}(t_3) = e^{-\lambda_1 t_3} \cdot e^{-\lambda_2 t_3} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_N t_3} = e^{-t_3 \sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad (4.1)$$

где N – количество элементов в устройстве;

λ_i – параметр экспоненциального распределения для i -го элемента, численно равный интенсивности отказов этого элемента, $i = 1, \dots, N$.

Из выражения (4.1) видно, что расчёт показателя безотказности $P_{\Sigma}(t_3)$ сводится к определению величины

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \lambda_i, \quad (4.2)$$

называемой суммарной интенсивностью отказов устройства.

Для среднего времени восстановления РЭУ T_B может быть получено выражение [1]

$$T_B \approx \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \tau_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad (4.3)$$

где τ_i – среднее время восстановления i -го элемента (значения этих величин можно найти в справочных таблицах [1] для различных видов элементов и классов аппаратуры).

4.2. Методы расчёта показателей надёжности

Существующие методы расчёта показателей безотказности и ремонтпригодности РЭУ различаются степенью точности учёта электрического режима, условий работы, конструкторско-технологических, функциональных и других особенностей элементов, входящих в состав устройства.

Расчёты подразделяют на предварительные (приближённые или ориентировочные) и окончательные.

Приближённые выполняют на ранних стадиях проектирования, обычно на стадии эскизного проекта (ЭП), окончательные – на стадии технического проекта (ТП). На практике используют различные виды приближённого расчёта. Простейшая из них описана в [1]. В этом случае учёт электрического режима, температуры, других параметров окружающей среды и факторов, влияющих на эксплуатационную безотказность элементов, выполняется приближённо с по-

мощью обобщённого эксплуатационного коэффициента $K_{Э.ОБ}$. Значение этого коэффициента зависит от вида РЭУ и условий его эксплуатации (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Значения обобщённого эксплуатационного коэффициента $K_{Э.ОБ}$ [1]

Вид РЭУ, условия эксплуатации	Значение $K_{Э.ОБ}$
Лабораторные условия	1,0
Помещения с регулируемой температурой и влажностью	1,1
Космос (на орбите)	1,5
Наземные стационарные условия	2...4,7 (2,5)
Наземные возимые РЭУ	4...7 (5,0)
Наземные подвижные (переносимые) РЭУ	7...15 (7,0)
Морские защищённые условия	7...12 (7,6)
Морские незащищённые условия	7...15 (10,0)
Бортовые самолётные РЭУ	5...10 (7,0)
Запуск ракеты	10...44 (20,0)

Примечание. В скобках указаны значения, рекомендуемые для использования в расчётах в случае недостаточности данных об условиях эксплуатации.

Суммарную интенсивность отказов РЭУ с учётом электрического режима и условий эксплуатации $\Lambda_{РЭУ}$ определяют как

$$\Lambda_{РЭУ} = K_{Э.ОБ} \cdot \sum_{j=1}^k \lambda_{0j} n_j, \quad (4.4)$$

где λ_{0j} – среднегрупповое значение интенсивности отказов элементов j -й группы, найденное с использованием справочников, $j = 1, \dots, k$;

k – число сформированных групп однотипных элементов;

n_j – количество элементов в j -й группе, $j = 1, \dots, k$.

Другие показатели безотказности подсчитывают по принятым формулам для экспоненциального распределения времени до отказа РЭУ (табл. 4.2) [1, 4].

Таблица 4.2

Расчёт показателей безотказности

Показатель безотказности	Расчётная формула	Номер формулы
Наработка на отказ	$T_0 = \frac{1}{\Lambda_{РЭУ}}$	(4.5)
Вероятность безотказной работы за заданное время t_3	$P_{РЭУ}(t_3) = e^{-t_3 \cdot \Lambda_{РЭУ}} = e^{-t_3/T_0}$	(4.6)
Среднее время безотказной работы устройства (средняя наработка до отказа)	$T_{cp} = T_0$	(4.7)
Гамма-процентная наработка до отказа T_γ	$T_\Gamma = -\frac{\ln(\gamma/100)}{\Lambda_{РЭУ}} = -T_0 \ln(\gamma/100)$	(4.8)

Показатели долговечности оценивают один раз на любой стадии опытно-конструкторских работ (ОКР), если это указано в договоре на выполнение ОКР.

В промышленности находит применение разновидность *приближённого расчёта* показателей безотказности и ремонтпригодности, в которой используют значения эксплуатационных интенсивностей элементов $\lambda_{\text{Э}}$ при коэффициенте нагрузке $K_{\text{н}} = 0,7$ для активных и $K_{\text{н}} = 0,4$ для пассивных элементов, а рабочую температуру принимают равной $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. При выполнении *уточнённого расчёта* значения эксплуатационных интенсивностей отказов элементов определяют для фактических значений параметров электрической нагрузки и условий эксплуатации.

При уточнённом расчёте суммарную интенсивность отказов РЭУ в виде электронного модуля (печатного узла) $\Lambda_{\text{М}}$ определяют суммированием прогнозных значений эксплуатационных интенсивностей отказов элементов $\lambda_{\text{Э}}$:

$$\Lambda_{\text{М}} = \sum_{i=1}^N \lambda_{\text{Э}i}, \quad (4.9)$$

где $\lambda_{\text{Э}i}$ – эксплуатационная интенсивность отказов i -го элемента (компонента), найденная с учётом его электрического режима, условий работы в составе РЭУ, конструкторско-технологических, функциональных и других особенностей;

N – количество элементов (компонентов) в модуле.

Пользуясь полученным значением $\Lambda_{\text{М}}$, по формулам (4.5)–(4.8) можно подсчитать интересующие показатели безотказности модуля.

Последовательность расчёта показателей безотказности РЭУ, состоящего из нескольких модулей (частей), описана в подразд. 7.2.

5. МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОИЗВОДСТВА СТРАН СНГ

5.1. Общая характеристика моделей

Значения эксплуатационной интенсивности отказов $\lambda_{\text{Э}}$ большинства групп элементов (компонентов) рассчитываются по математической модели

$$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} \prod_{i=1}^m K_i, \quad (5.1)$$

где $\lambda_{\text{Б}}$ – базовая интенсивность отказов элементов данной группы;

K_i – коэффициенты, учитывающие изменения эксплуатационной интенсивности отказов в зависимости от различных факторов;

m – число учитываемых факторов.

Для отдельных групп сложных электрорадиоизделий (ЭРИ), суммарный поток отказов которых складывается из независимых потоков отказов составных частей ЭРИ (например электромагнитной катушки и контактной системы

реле), математическая модель расчёта эксплуатационной интенсивности отказов имеет вид

$$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б1}} \prod_{i=1}^{m_1} K_i^{(1)} + \dots + \lambda_{\text{Бn}} \prod_{i=1}^{m_n} K_i^{(n)}, \quad (5.2)$$

где $\lambda_{\text{Б}j}$ – исходная (базовая) интенсивность отказов j -й части изделия, $j = 1, \dots, n$;
 n – количество составных частей изделия;
 $K_i^{(j)}$ – коэффициент, учитывающий влияние i -го фактора для j -й части изделия; $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$;
 m_j – количество факторов, учитываемых для i -й части изделия.

В формуле (5.2) принято во внимание, что разные части (компоненты) ЭРИ могут иметь различные значения коэффициентов, учитывающих влияние одного и того же фактора, в частности уровень качества изготовления в условиях производства (вид приёмки). Например, электромагнитная катушка реле может изготавливаться с уровнем качества, определяемым приёмкой «1», на одном предприятии, а контактная система и сборка реле в целом могут выполняться с приёмкой «3» на другом предприятии. Конкретная запись моделей для элементов зависит также от конструктивных особенностей элемента и количества задействованных частей (например, контактов в случае коммутационных изделий или соединителей). Индивидуальные (для компонентов) составляющие интенсивности отказов $\lambda_{\text{Б}}$, называемые базовыми интенсивностями отказов, могут быть взяты из справочников или подсчитаны по моделям, приводимым в соответствующих разделах учебного пособия.

В табл. 5.1 приводятся математические модели, рекомендуемые для расчёта (прогнозирования) значений $\lambda_{\text{Э}}$ типовых элементов РЭС производства стран СНГ. При систематизации этих моделей в основу были положены справочники по надёжности, разработанные в России [11, 12]. Уточнение моделей было сделано на основе анализа и систематизации руководств военных справочников и стандартов США, Франции и Китая [13–15]. Пояснение величин, входящих в математические модели, даётся в табл. 5.2.

Таблица 5.1

Математические модели определения значений $\lambda_{\text{Э}}$ для элементов производства стран СНГ

Класс (группа) элементов	Вид математической модели	Номера формул и таблиц для определения коэффициентов
Интегральные микросхемы (типовой электрический режим работы)	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_I K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	(5.3), (5.4), табл. 5.4–5.6
Интегральные микросхемы, работающие в облегчённых электрических режимах	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	(5.5), (5.3), табл. 5.4–5.6
Диоды, кроме стабилитронов. Диодные сборки	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{Ф}} K_{\text{Д}} K_U K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	(5.7), табл. 5.7–5.10
Стабилитроны	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	(5.7), табл. 5.7

Класс (группа) элементов	Вид математической модели	Номера формул и таблиц для определения коэффициентов
Транзисторы биполярные, транзисторные сборки	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{Ф}} K_{\text{Д}} K_{\text{У}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.7), табл. 5.7–5.10
Транзисторы полевые	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{Ф}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.7), табл. 5.7, 5.8
Тиристоры	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{Д}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.7), табл. 5.7, 5.9
Диоды СВЧ	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{Д}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	–
Транзисторы биполярные мощные СВЧ	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{I}} K_{\text{F}} K_{\text{Ф}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	–
Оптоэлектронные элементы (светодиоды, оптопары)	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.8)–(5.10)
Микросхемы оптоэлектронные (типовой электрический режим работы)	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	–
Конденсаторы неполярные, оксидно-электролитические, кроме импульсных	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{С}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.11), табл. 5.11, 5.12
Оксидно-электролитические импульсные	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{I}} K_{\text{С}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	–
Резисторы постоянные: металлодиэлектрические металлизированные, композиционные	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{R}} K_{\text{M}} K_{\Delta} K_{\Theta} K_{\text{П}}$ $\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{R}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.12), табл. 5.13–5.15 (K_{Δ} – см. с. 30)
Резисторы переменные: проволочные	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{R}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.12), табл. 5.13, 5.15
непроволочные	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{R}} K_{\text{У}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.12), табл. 5.13, 5.15, 5.16
Терморезисторы	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\Theta}$	–
Элементы коммутации (переключатели, тумблеры, кнопки и т.п.)	$\lambda_{\Theta} = (\lambda_{\text{Б}}^{(\text{к.и})} K_{\text{К}} K_{\text{F}} + \lambda_{\text{Б}}^{(\text{вкл})} NF) K_{\text{Р}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.13)–(5.14), табл. 5.17
Соединители (разъёмы): низкочастотные	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\text{К}} K_{\text{н}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.15)–(5.17)
радиочастотные	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{I}} K_{\text{К}} K_{\text{н}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.15)–(5.19)
Индикаторы		
полупроводниковые	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.8)
вакуумные люминесцентные	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{I}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.20)
другие индикаторы, ЭЛТ, кинескопы и т. п.	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	–
Трансформаторы	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.21)–(5.24), табл. 5.18
Дроссели, катушки индуктивности	$\lambda_{\Theta} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Р}} K_{\Theta} K_{\text{П}}$	(5.25)
Реле электромагнитные общего назначения	$\lambda_{\Theta} = (\lambda_{\text{Б}}^{(\text{L})} K_{\text{Р}}^{(\text{L})} K_{\text{F}} K_{\text{П}}^{(\text{L})} + \lambda_{\text{Б}}^{(\text{КОМ})} FK_{\text{Р}} K_{\text{К}} K_{\text{П}}) K_{\Theta}$	(5.25)–(5.28), табл. 5.19
Реле и автоматы защиты		(5.25), (5.27),

		табл. 5.19
--	--	------------

Окончание табл. 5.1

Класс (группа) элементов	Вид математической модели	Номера формул и таблиц для определения коэффициентов ¹
Прочие элементы и компоненты		
Резонаторы пьезоэлектрические	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_t K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	(5.29)
Предохранители	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_t K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	(5.30)
Платы со сквозными металлизированными отверстиями (пайки отверстий)	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} [N_1 K_{\text{сл}} + N_2 (K_{\text{сл}} + 13)] K_t K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	(5.30)
Соединения, в том числе пайкой ²	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_t K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	(5.30)
Электрические лампочки	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$, принимается $K_{\text{Э}} = 1$	–
Кабели, шнуры, монтажные провода	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} L K_T K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	(5.31)–(5.34), табл. 5.20

Примечания: ¹ Значения коэффициентов $K_{\text{Э}}$ и $K_{\text{П}}$ приводятся в табл. 5.22 и 5.23.

² Модель распространяется на любые соединения (пайки), используемые во всех платах (узлах), кроме соединений (паек) в платах с металлизированными отверстиями. Все виды паяк сквозных металлизированных отверстий следует учитывать в модели расчёта эксплуатационной интенсивности отказов плат с металлизированными отверстиями.

Таблица 5.2

Пояснения величин (параметров), входящих в математические модели

Параметр	Пояснение
Составляющие, входящие в модели для всех видов элементов	
$\lambda_{\text{Б}}$	Базовая интенсивность отказов элементов данной группы (или конкретного типа), отвечающая температуре окружающей среды +25 °С и номинальной электрической нагрузке, т. е. значению коэффициента электрической нагрузки $K_{\text{Н}} = 1$
$K_{\text{Р}}$	Коэффициент режима работы, зависящий от электрической нагрузки (коэффициента $K_{\text{Н}}$) и температуры корпуса элемента
K_t	Коэффициент, зависящий от температуры корпуса элемента (компонента)
$K_{\text{Э}}$	Коэффициент эксплуатации, зависящий от жёсткости условий эксплуатации РЭУ
$K_{\text{П}}$	Коэффициент приёмки, учитывающий степень жёсткости требований к контролю качества и правила приёмки элементов (компонентов РЭУ) в условиях производства
Составляющие, входящие в модели для интегральных микросхем (ИМС)	
$K_{\text{ИС}}$	Коэффициент, учитывающий количество элементов в ИМС или бит (для ИМС памяти)
$K_{\text{корп}}$	Коэффициент, учитывающий тип корпуса
$K_{\text{У}}$	Коэффициент, учитывающий напряжение питания для КМОП ИМС
Составляющие, входящие в модели для полупроводниковых приборов	
$K_{\text{Ф}}$	Коэффициент, учитывающий функциональный режим работы прибора
$K_{\text{Д}}$	Коэффициент, зависящий от значения максимально допустимой по ТУ нагрузки по мощности (или току)

K_U	Коэффициент, зависящий от отношения рабочего напряжения к максимально допустимому по ТУ (коэффициента нагрузки по напряжению)
-------	---

Окончание табл. 5.2

Параметр	Пояснение
Составляющие, входящие в модели для конденсаторов	
K_C	Коэффициент, зависящий от значения номинальной ёмкости
Составляющие, входящие в модели для резисторов	
K_R	Коэффициент, зависящий от значения номинального сопротивления
K_M	Коэффициент, зависящий от значения номинальной мощности (для металлодиэлектрических резисторов)
$K_{доп}$	Коэффициент, зависящий от значения допуска на сопротивление (для металлодиэлектрических резисторов)
K_U	Коэффициент, зависящий от отношения значения рабочего напряжения $U_{раб}$ на резисторе к максимально допустимому напряжению по ТУ ($U_{ТУ}$); $U_{раб} = \sqrt{P_{раб} R}$, где $P_{раб}$ – рабочая мощность, Вт; R – сопротивление, Ом
Составляющие, входящие в модели для изделий коммутации и соединителей	
K_K	Коэффициент, зависящий от количества задействованных контактов
K_n	Коэффициент, зависящий от количества сочленений-расчленений n (соединители)
$t_{п}$	Температура перегрева контактов по ТУ при максимальной токовой нагрузке. Используется для выбора коэффициента K_K
K_F	Коэффициент, учитывающий число коммутаций в час
$\lambda_B^{(к.и)}$	Базовая интенсивность отказов коммуникационного изделия в целом, 1/ч
$\lambda_B^{(вкл)}$	Дополнительная интенсивность отказов, приходящаяся на одно включение при работе коммуникационного изделия в составе РЭУ, 1/вкл.
L	Верхний индекс, означающий, что соответствующие величины относятся к электромагнитной катушке реле
$\lambda_B^{(ком)}$	Интенсивность отказов реле, приходящаяся на одну коммутацию
F	Средняя частота переключений или коммутации изделия в час в РЭУ
N	Количество активных контактов (контактирующих точек)
Составляющие, входящие в модели для печатных плат с металлизированными сквозными отверстиями	
λ_B	Базовая интенсивность отказов межсоединений в зависимости от технологии
$K_{сл}$	Коэффициент, учитывающий количество слоёв n в плате
N_1	Количество сквозных отверстий, пропаянных способом «пайка волной»
N_2	Количество сквозных отверстий, пропаянных ручным способом
Составляющие, входящие в модели для шнуров, кабелей, монтажных проводов	
L	Длина кабельного изделия в РЭУ, м
K_T	Коэффициент, зависящий от рабочей температуры, материала, конструкции изоляции и оболочки
λ_B	Базовая интенсивность отказов кабельных изделий при температуре +25 °С, 1/ч · м (табл. 5.3)
Составляющие, входящие в модели для соединений	

λ_B	Базовая интенсивность отказов соединения (табл. 5.3)
-------------	--

Коэффициент приёмки K_{II} корректирует справочные данные о безотказности с учётом уровня качества изготовления используемых элементов (компонентов). Корректировка выполняется относительно того уровня, для которого приводятся справочные данные об интенсивности отказов элемента. В качестве такого уровня качества в справочниках, разрабатываемых Министерством обороны бывшего СССР, а затем России выбрана приёмка «5» – общее военное применение (ОВП, ВП) [16].

В табл. 5.3 приводятся базовые интенсивности отказов (λ_B) групп элементов (компонентов) РЭС, соответствующие приёмке «5» (приёмке ОВП), для которой коэффициент приёмки $K_{II} = 1,0$. Пересчёт значений λ_B применительно к другим видам приёмки выполняется с использованием значений K_{II} , приведённых в подразд. 5.13.

Таблица 5.3

Базовые интенсивности отказов групп элементов и компонентов РЭС

Группа элементов	$\lambda_B, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$
1. Интегральные микросхемы (ИМС)	
Полупроводниковые цифровые: логические, арифметические, микропроцессоры и микропроцессорные комплекты, регистры сдвига и др.	0,023
оперативные запоминающие устройства (ОЗУ)	0,030
постоянные запоминающие устройства (ПЗУ, ППЗУ, РПЗУ)	0,018
Полупроводниковые аналоговые	0,028
Гибридные ИМС	0,043
2. Полупроводниковые приборы (ППП)	
Диоды выпрямительные	0,091
Столбы (мосты) выпрямительные	0,21
Диоды импульсные	0,025
Варикапы подстроечные	0,022
Стабилитроны	0,0041
Транзисторы биполярные кремниевые, кроме СВЧ	0,044
Транзисторы полевые: кремниевые	0,065
арсенидогаллиевые	0,578
Тиристоры кремниевые	0,2
Диоды СВЧ: кремниевые (кроме умножительных и настроечных)	0,162
кремниевые умножительные и настроечные	1,61
арсенидогаллиевые	0,21
Транзисторы СВЧ малой и средней мощности	0,064
Транзисторы СВЧ большой мощности	0,18
3. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы	
Фотодиоды на основе кремния	0,185
Фототранзисторы	0,15
Фоторезисторы на основе <i>PbS</i>	1,8
Диоды излучающие инфракрасного и видимого диапазона (светодиоды)	0,034

Оптопары диодные, транзисторные	0,051
Оптопары тиристорные, резисторные, микросхемы оптоэлектронные	0,19

Продолжение табл. 5.3

Группа элементов	$\lambda_B, \times 10^{-6} 1/ч$
4. Знакосинтезирующие индикаторы	
Индикаторы полупроводниковые ¹ :	
буквенно-цифровые	0,42
дисплеи с диодной матрицей	0,21
Индикаторы вакуумные люминесцентные:	
цифровые	0,83
буквенно-цифровые	0,69
Индикаторы вакуумные накаливаемые цифровые	0,31
Индикаторы газоразрядные:	
цифровые	0,79
буквенно-цифровые	2,25
Индикаторы жидкокристаллические цифровые многоразрядные	0,88
5. Конденсаторы	
слюдяные	0,04
керамические	0,022
бумажные и металлобумажные	0,019
с органическим синтетическим диэлектриком	0,028
электролитические алюминиевые	0,173
6. Резисторы	
Резисторы постоянные непроволочные:	
металлодиэлектрические, металлизированные	0,044
композиционные	0,034
Резисторы переменные:	
непроволочные	0,179
проволочные	0,183
Терморезисторы	0,007
7. Элементы коммутации²	
Переключатели галетные	0,058 / 0,0027 (1/вкл.)
Тумблеры	0,1 / 0,0064 (1/вкл.)
Кнопки, кнопочные переключатели	0,16 / 0,009 (1/вкл.)
Микропереключатели	0,045/0,0019 (1/вкл.)
Переключатели на базе герконов	0,13 / 0,005 (1/вкл.)
Контакты магнитоуправляемые:	
замыкающего типа	0,0007 (1/сраб.)
переключающего типа	0,018 (1/сраб.)
8. Соединители (разъёмы):	
низкочастотные прямоугольные для печатного монтажа	0,0041
низкочастотные для объёмного монтажа	0,0104
радиочастотные с полиэтиленовой изоляцией	0,015
10. Прочие элементы и компоненты	
Трансформаторы:	
питания	0,0035
преобразователей напряжения	0,0072
согласующие, импульсные и др.	0,0019
Электронно-лучевые трубки:	
осциллографические, индикаторные	1,67
кинескопы монохромные	1,1
кинескопы цветные	13,17
Дроссели	0,033

Катушки индуктивности	0,01
Реле электромагнитные общего назначения ³	0,0304 (1/ком.)

Окончание табл. 5.3

Группа элементов	$\lambda_B, \times 10^{-6}$ 1/ч
Пьезоэлектрические приборы (кварцевые резонаторы, датчики, фильтры)	0,026
Линии задержки	0,04
Предохранители	0,011
Держатели предохранителей	0,003
Индикаторные электрические лампочки при минимальной продолжительности горения T_{\min} , указываемой в ТУ: при переменном напряжении до 12 В при постоянном напряжении до 12 В при переменном напряжении 200...240 В	1,8 5,4 77,8
Соединения (значения базовой интенсивности отказов): ручная пайка без накрутки ручная пайка с накруткой пайка волной обжимка (опрессовка) клеммный блок (узел)	0,0013 0,00007 0,000069 0,00012 0,062
Пайки сквозных металлизированных отверстий в платах с металлизированными отверстиями (значения базовой интенсивности отказов в зависимости от технологии межсоединений): печатный монтаж монтаж дискретными проводниками	0,000017 0,00011
Кабели, шнуры, провода монтажные (значения базовой интенсивности отказов) ⁴ : кабели (провода) радиочастотные коаксиальные провода монтажные низковольтные обычной теплостойкости шнуры питания гибкие с резиновой изоляцией (без вилок питания)	0,00127 (1/м) 0,0577 (1/м) 0,037 (1/м)

Примечания: 1. Для ИМС базовые интенсивности отказов соответствуют ИС средней степени их интеграции не в пластмассовых корпусах, условиям типовой (усреднённой) электрической нагрузки и температуре окружающей среды $t = +25$ °С.

2. Для ППП, включая полупроводниковые индикаторы, интенсивность отказов соответствует приборам не в пластмассовых (полимерных) корпусах.

¹ Указано значение, приходящееся на один разряд индикатора (диодной матрицы).

² Интенсивность отказов коммутационного изделия в целом (числитель) и дополнительная интенсивность отказов, приходящаяся на одно переключение при работе (знаменатель).

³ Интенсивность отказов, приходящаяся на одну коммутацию (срабатывание).

⁴ Базовая интенсивность отказов, приходящаяся на 1 метр длины.

В подразд. 5.2–5.13 приводятся формулы (модели) и таблицы, полученные путём анализа справочников [10–12], которые могут быть использованы для определения коэффициентов, входящих в модели расчёта величин λ_{Σ} .

5.2. Интегральные микросхемы

Для определения коэффициента $K_{ИС}$, учитывающего количество элементов в ИМС или бит (для ИМС памяти), можно воспользоваться математической моделью, полученной по табличным данным работы [15]:

$$K_{ИС} = AN^S, \quad (5.3)$$

где A, S – постоянные коэффициенты модели (табл. 5.4);
 N – количество элементов в ИМС или бит.

Таблица 5.4

Коэффициенты моделей (5.3) и (5.4) для различных групп ИМС

Группа ИМС	A	S	B
1. Полупроводниковые цифровые (логические, арифметические, микропроцессоры, регистры сдвига и др.)	0,336	0,288	0,021
2. Оперативные запоминающие устройства (ОЗУ)	0,468	0,168	0,021
3. Постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) и программируемые ПЗУ (ППЗУ)	0,963	0,128	0,021
4. Перепрограммируемые ПЗУ (РПЗУ)	1,113	0,128	0,021
5. Аналоговые ИМС	0,478	0,253	0,023
6. Гибридные интегральные ИМС	0,796	0,120	0,024

Значения коэффициента K_t могут быть получены по выражению

$$K_t = \exp[B(t_{\text{окр}} - 25)], \quad (5.4)$$

где B – константа, зависящая от функционального назначения ИМС (см. табл. 5.4);

$t_{\text{окр}}$ – температура среды, окружающей ИМС, °С.

Для ИМС, работа которых допускается в облегчённых электрических режимах, значения коэффициента K_p могут быть рассчитаны с помощью математической модели:

$$K_p = 0,045 \exp(3,1K_{\text{обл}}) \exp[B(t_{\text{окр}} - 25)], \quad (5.5)$$

где $K_{\text{обл}}$ – отношение рабочей электрической нагрузки к максимально допустимой (электрическая характеристика, принимаемая во внимание, выбирается в зависимости от характера облегчённости электрического режима ИМС).

Значение $t_{\text{окр}}$ может определяться по выражению

$$t_{\text{окр}} = t_{\text{раб max}} + \Delta t_3, \quad (5.6)$$

где $t_{\text{раб max}}$ – верхнее значение рабочей температуры РЭУ;

Δt_3 – перегрев в нагретой зоне конструкции РЭУ (обычно $\Delta t_3 \leq 25 \dots 30$ °С).

Значения коэффициента $K_{\text{корп}}$ в зависимости от типа корпуса ИМС приведены в табл. 5.5. Значения коэффициента K_V следует выбирать из табл. 5.6.

Таблица 5.5

Значения коэффициента $K_{\text{корп}}$

Корпус	$K_{\text{корп}}$	Корпус	$K_{\text{корп}}$
Все корпуса, кроме пластмассовых (полимерных)	1,0	Пластмассовые (полимерные)	3,0

Таблица 5.6

Значения коэффициента K_V в зависимости от максимальных значений напряжения питания

Технология	Значение K_V для напряжения источника питания, В		
	до 10	> 10 до 12,6	> 12,6 до 15
КМОП	1,0	3,0	10,0
Прочие виды технологий	1,0		

5.3. Полупроводниковые приборы

Значения коэффициента K_p могут быть рассчитаны с помощью математической модели:

$$K_p = A \exp \left[\frac{N_T}{273 + t_{\text{окр}} + \Delta t K_H} + \left(\frac{273 + t_{\text{окр}} + \Delta t K_H}{T_M} \right)^L \right], \quad (5.7)$$

где A , N_T , T_M , L , Δt – константы модели;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды;

K_H – коэффициент электрической нагрузки (см. табл. 3.1).

Значения констант, входящих в модель (5.7), приведены в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Константы модели (5.7)

Группа элементов	A	N_T	T_M	L	Δt
Диоды, кроме стабилитронов. Диодные сборки	44,1025	-2138	448	17,7	150
Стабилитроны	2,1935	-800	448	14,0	150
Транзисторы биполярные, кроме мощных СВЧ. Транзисторные сборки. Полевые транзисторы	5,2	-1162	448	13,8	150
Тиристоры	37,2727	-2050	448	9,6	150

Значения коэффициента K_Φ следует выбирать из табл. 5.8.

Таблица 5.8

Влияние функционального режима работы на коэффициент K_Φ

Группа приборов	Функциональный режим работы	K_Φ
Диоды выпрямительные, универсальные, импульсные, столбы выпрямительные, варикапы подстроечные, диодные сборки	Линейный	1,0
	Переключающий	0,6
	Выпрямительный	1,5

Транзисторы биполярные, кроме мощных СВЧ. Транзисторные сборки	Линейный	1,5
	Переключающий	0,7
	Генераторный	0,7
	Высоковольтные приборы	1,5
Транзисторы полевые	Кремниевые приборы:	
	<i>линейный</i>	1,5
	<i>переключающий</i>	0,7
	<i>генераторный</i>	1,0
	<i>СВЧ-диапазона</i>	5,0
Арсенидогаллиевые приборы	7,5	

При выборе коэффициента K_D следует руководствоваться табл. 5.9.

Таблица 5.9

Значения коэффициента K_D

Группа приборов	Нагрузка	Значение нагрузки	K_D
Диоды, диодные сборки	Максимально допустимый по ТУ средний прямой ток $I_{пр.ср} \max \text{ ТУ, А}$	≤ 1	0,6
		$> 1 \leq 3$	0,8
		$> 3 \leq 10$	1,0
		$> 10 \leq 20$	2,0
Транзисторы биполярные, кроме мощных СВЧ. Транзисторные сборки. Варикапы подстроечные	Максимально допустимая по ТУ рассеиваемая мощность $P_{\max} \text{ ТУ, Вт}$	≤ 1	0,5
		$> 1 \leq 5$	0,8
		$> 5 \leq 20$	1,0
		$> 20 \leq 50$	1,3
		$> 50 \leq 200$	2,5
Тиристоры	Максимально допустимый по ТУ средний прямой ток $I_{пр.ср} \max \text{ ТУ, А}$	≤ 1	1,0
		$> 1 \leq 5$	3,0
		$> 5 \leq 25$	6,0
		$> 25 \leq 50$	10,0

Значения коэффициента K_U приведены в табл. 5.10.

Таблица 5.10

Значения коэффициента K_U

Группа приборов	Коэффициент нагрузки по напряжению $K_H^{(U)}$	Значение или модель расчёта K_U
Диоды, варикапы подстроечные, диодные сборки ¹	От 0 до 0,6	0,7
	$> 0,6$ до 1,0	$K_U = 1/[2,11 - 1,11K_H^{(U)}]$
Транзисторы биполярные, кроме мощных СВЧ. Транзисторные сборки.	От 0 до 0,5	0,5
	$> 0,5$ до 1,0	$K_U = 1/[2,42 - 2,09K_H^{(U)}]$

Примечание. ¹ Используется коэффициент нагрузки по обратному напряжению.

5.4. Оптоэлектронные элементы

Значения коэффициента K_P для излучающих диодов, оптопар транзисторных, тиристорных, диодных и резисторных могут быть рассчитаны с помощью математической модели:

$$K_P = \left(\frac{I_{пр.ср}}{I_{пр.ср 0}} \right)^m \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{t_{n0} + 273} - \frac{1}{t_n + 273} \right) \right], \quad (5.8)$$

где $I_{\text{пр.ср}}$, $I_{\text{пр.ср}0}$ – средний прямой ток излучателя соответственно в рабочем и номинальном режимах;

E_a – энергия активации процессов деградации ($E_a = 0,6$ эВ);

k – постоянная Больцмана ($k = 8,625 \cdot 10^{-5}$ эВ/К);

m – показатель степени, зависящий от свойств кристалла и принимающий значения от 1 до 2;

$t_{\text{п}}$, $t_{\text{п}0}$ – температура p – n -перехода соответственно в рабочем и номинальном режимах, °С.

При работе элемента в импульсном режиме $m = 2$. Для других режимов в зависимости от типа излучающего материала величина m равна:

1,4 – для $GaAs$; 1,2 – для GaP ; 1,5 – для $GaAlAs$, $GaAsP$.

Температура p – n -перехода определяется по формуле

$$t_{\text{п}} = P_{\text{раб}} R_{\text{T}} + t_{\text{окр}}; \quad t_{\text{п}0} = P_{\text{max}} R_{\text{T}} + 25 \text{ °С}, \quad (5.9)$$

где $P_{\text{раб}}$ – рассеиваемая мощность в рабочем режиме при температуре $t_{\text{окр}}$, Вт;

R_{T} – тепловое сопротивление, °С/Вт;

P_{max} – максимальная рассеиваемая мощность при температуре +25 °С, Вт;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С.

При отсутствии значений R_{T} температура p – n -перехода примерно может быть определена как

$$t_{\text{п}} \approx t_{\text{раб max}} + \frac{I_{\text{пр.ср}}}{I_{\text{пр.ср}0}} 20, \text{ °С}; \quad t_{\text{п}0} = t_{\text{ном}} + 20 \text{ °С} = 25 + 20 = 45 \text{ °С}, \quad (5.10)$$

где $t_{\text{раб max}}$ – максимальная рабочая температура РЭУ, °С.

Значение коэффициента K_p для оптоэлектронных микросхем может быть принято равным единице [10].

5.5. Конденсаторы

Значения коэффициента K_p могут быть рассчитаны с помощью математической модели:

$$K_p = A \left[\left(\frac{K_H}{N_S} \right)^H + 1 \right] \exp \left[B \left(\frac{t_{\text{окр}} + 273}{N_T} \right)^G \right], \quad (5.11)$$

где $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды (корпуса элемента), °С;

K_H – коэффициент электрической нагрузки конденсатора по напряжению;

A , B , N_T , G , N_S , H – постоянные коэффициенты (табл. 5.11).

Таблица 5.11

Постоянные коэффициенты модели (5.11)

Группа конденсаторов	A	B	N_T	G	N_S	H
Керамические, стеклокерамические, подстроечные с твёрдым диэлектриком	$5,909 \cdot 10^{-7}$	14,3	398	1	0,3	3
Слюдяные	$9,885 \cdot 10^{-8}$	16	358	1	0,4	3
С органическим синтетическим диэлектриком	$9,259 \cdot 10^{-3}$	2,5	358	18	0,4	5
Бумажные и металобумажные	$9,583 \cdot 10^{-3}$	2,5	358	18	0,4	5
Оксидно-электролитические алюминиевые	$3,59 \cdot 10^{-2}$	4,09	358	5,9	0,55	3

Значения коэффициента K_C могут быть подсчитаны по математическим моделям, приведённым в табл. 5.12.

Таблица 5.12

Модели для подсчёта коэффициента K_C

Группа конденсаторов	Модель	Примечание
Тонкоплёночные с неорганическим диэлектриком	$K_C = 1$	–
Керамические и стеклокерамические	$K_C = 0,4C^{0,12}$	C в пФ
Слюдяные	$K_C = 0,4C^{0,14}$	C в пФ
Бумажные и металобумажные	$K_C = C^{0,05}$	C в мкФ
С органическим синтетическим диэлектриком	$K_C = C^{0,05}$	C в мкФ
Оксидно-электролитические алюминиевые	$K_C = 0,2C^{0,23}$	C в мкФ

5.6. Резисторы

Значения коэффициента K_P рассчитывают по модели

$$K_P = A \exp \left[B \left(\frac{t_{\text{окр}} + 273}{N_T} \right)^G \right] \exp \left\{ \left[\left(\frac{K_H}{N_S} \right) \left(\frac{t_{\text{окр}} + 273}{273} \right)^J \right]^H \right\}, \quad (5.12)$$

где K_H – коэффициент электрической нагрузки резистора по мощности;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды (корпуса элемента), °С;

A, B, N_T, G, N_S, J, H – постоянные коэффициенты (табл. 5.13).

Таблица 5.13

Постоянные коэффициенты модели (5.12)

Группа резисторов	A	B	N_T	G	N_S	J	H
Резисторы постоянные:							
металлодиэлектрические, металлизированные	0,260	0,5078	343	9,278	0,878	1	0,886
композиционные плёночные	0,06	1,616	328	2,746	0,622	1,198	0,770
композиционные объёмные	0,093	2,194	358	2,019	1,245	1,2	1,362
Резисторы переменные:							

непроволочные керметные	0,399	1,5419	343	9,8965	3,1668	1,3071	0,6012
композиционные объёмные, потенциометры	0,655	0,693	373	7,223	2,895	1	1,335
проволочные	0,202	1,14	343	21,7	0,529	1	0,599

Значения коэффициентов K_M , K_R и K_U выбирают из табл. 5.14–5.16 .

Таблица 5.14

Значения коэффициента K_M для металлодиэлектрических резисторов

Мощность, Вт	K_M	Мощность, Вт	K_M	Мощность, Вт	K_M
0,062–0,5	0,7	1–2	1,5	5–10	4,5

Таблица 5.15

Значения коэффициента K_R

Диапазон сопротивлений	K_R	Диапазон сопротивлений	K_R	Диапазон сопротивлений	K_R
Резисторы постоянные непроволочные: металлодиэлектрические					
< 1 кОм	1,0	≥ 1 кОм < 100 кОм	0,7	≥ 100 кОм < 1 МОм	2,0
углеродистые					
≤ 100 кОм	0,5	> 100 кОм ≤ 1 МОм	2,7	> 1 МОм	0,7
Резисторы переменные: непроволочные керметные					
> 10 Ом ≤ 100 Ом	1,6	> 100 Ом ≤ 330 Ом	1,4	> 330 Ом	1,0
проволочные					
≤ 1 кОм	1,9	> 1 кОм ≤ 10 кОм	0,5	> 10 кОм ≤ 100 кОм	0,9

Таблица 5.16

Значения коэффициента K_U для переменных непроволочных резисторов

$U_{раб} / U_{ТУ}$	K_U	$U_{раб} / U_{ТУ}$	K_U	$U_{раб} / U_{ТУ}$	K_U
≥ 0,1 ≤ 0,8	1,0	> 0,8 ≤ 0,9	1,05	> 0,9 ≤ 1,0	1,2

Значения коэффициента K_Δ в зависимости от допуска на сопротивление резистора: 2 – при допуске ±0,5 %, 1 – при допуске ±1, ±2, ±5, ±10 % и более.

5.7. Элементы коммутации

Значения K_p рассчитывают по модели

$$K_p = 7 \left(\frac{t + 273}{398} \right)^{12} \exp(1,25 K_H)^2, \quad (5.13)$$

где t – рабочая температура, °С ($25 \leq t \leq t_{max}$);

t_{max} – максимально допустимая по ТУ температура окружающей среды;

K_H – коэффициент электрической нагрузки по току.

Значения коэффициента K_K выбирают из табл. 5.17.

Значения коэффициента K_K для коммутационных изделий

Группа изделий	Количество задействованных контактов N	K_K	Группа изделий	Количество задействованных контактов N	K_K
Тумблеры	Однополюсные	0,5	Переключатели кнопочные, движковые	1	0,25
	Двухполюсные	1,0		2	1,0
	Трёхполюсные	1,5		≥ 3	2,0
	Четырёхполюсные	2,0	Переключатели галетные	–	1

Значения коэффициента K_F в зависимости от частоты включений в час:

$$K_F = 0,5 \text{ при } F < 100; K_F = 0,5 + 0,25 \lg F \text{ при } F \geq 100, \quad (5.14)$$

где F – частота коммутаций изделия в РЭУ, включений в час.

5.8. Соединители (разъёмы)

Значения K_P определяют по модели

$$K_P = \exp \left[9000 \left(\frac{1}{298 + t_n} - \frac{1}{273 + t_{\text{окр}} + t_n \exp [-1,8(1 - K_H)]} \right) \right], \quad (5.15)$$

где t_n – температура перегрева контактов по ТУ при максимальной токовой нагрузке, по ТУ $t_n = 10 \dots 30$ °С;

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С;

K_H – коэффициент электрической нагрузки по току.

Значения коэффициента, учитывающего влияние на надёжность соединителя количества задействованных контактов N , могут быть рассчитаны как

$$K_K = \exp \left\{ [0,1(N-1)]^{0,51064} \right\}. \quad (5.16)$$

Значения коэффициента, учитывающего влияние на надёжность соединителя количества сочленений–расчленений n , рассчитываются по модели

$$K_n = 0,32 \exp(0,0028n). \quad (5.17)$$

Значения коэффициента K_t для радиочастотных соединителей могут быть получены по выражению

$$K_t = \exp [0,023(t_{\text{раб}} - 25)], \quad (5.18)$$

где $t_{\text{раб}}$ – рабочая температура радиочастотного соединителя, °С.

Температуру $t_{\text{раб}}$ определяют как [11, 12]

$$t_{\text{раб}} = t_{\text{окр}} + 5, \text{ °С}, \quad (5.19)$$

где $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С.

5.9. Знакосинтезирующие индикаторы

Значения коэффициента K_p для полупроводниковых индикаторов определяют по модели (5.8) точно так же, как и для излучающих диодов инфракрасного диапазона.

Значения коэффициента K_t для вакуумных люминесцентных индикаторов с зелёным люминофором могут быть рассчитаны по формуле

$$K_t = \exp[0,00923(t_{\text{окр}} - 25)], \quad (5.20)$$

где $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С.

Для других цветов люминофора K_t принимается равным единице [10–12].

5.10. Трансформаторы

Значения коэффициента K_p рассчитывают по модели

$$K_p = A \exp \left[\left(\frac{t_M + 273}{T_M} \right)^G \right], \quad (5.21)$$

где t_M – температура максимально нагретой точки обмотки трансформатора, характеризуется классом изоляции;

A, G, T_M – постоянные модели (табл. 5.18).

Таблица 5.18

Значения постоянных модели (5.21)

Максимально допустимая температура по ТУ t_{max} , °С (класс изоляции)	A	G	T_M	Максимально допустимая температура по ТУ t_{max} , °С (класс изоляции)	A	G	T_M
70...85 (А)	0,81	15,6	329	95...105 (В)	0,891	14	352

Температуру t_M определяют как

$$t_M = t_{\text{окр}} + t_{\text{п}}, \quad (5.22)$$

где $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С;

$t_{\text{п}}$ – температура перегрева, °С.

Значения $t_{\text{п}}$ для частоты питающей сети $f = 50$ Гц рассчитывают по формуле

$$t_{\text{п}} = 0,25 t_{\text{п.ТУ}} (3K_H^2 + 1), \quad (5.23)$$

для $f > 50$ Гц:

$$t_{\text{п}} = 0,5 t_{\text{п.ТУ}} (K_H^2 + 1), \quad (5.24)$$

где $t_{\text{п.ТУ}}$ – максимальная температура перегрева по ТУ, °С;

K_H – коэффициент электрической нагрузки трансформатора по мощности.

Для трансформаторов питания РЭС: $t_{\text{max}} = 85$ °С; $t_{\text{п.ТУ}} \approx 55$ °С.

5.11. Прочие элементы и компоненты

Дроссели, катушки индуктивности. Значения коэффициента K_p примерно могут быть рассчитаны с помощью математической модели:

$$K_p = 0,46 + 0,012(t_{\text{окр}} - 50)^{1,3} + 0,54K_H^{3,5} \exp\left[0,2(t_{\text{окр}} - 50)^{0,8}\right], \quad (5.25)$$

где K_H – коэффициент нагрузки по току (см. табл. 3.1);

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С (при $t_{\text{окр}} < 50$ °С принять $t_{\text{окр}} = 50$ °С)

Реле. Значения коэффициента K_p рассчитывают по модели вида

$$K_p = A \exp\left[\left(\frac{t_{\text{окр}} + 273}{N_T}\right)^G\right] \exp\left[\left(\frac{K_H}{N_S}\right)^H\right], \quad (5.26)$$

где A , N_T , G , N_S , H – постоянные коэффициенты (табл. 5.19);

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С;

K_H – коэффициент нагрузки реле по коммутируемому току ($K_H = I_{\text{раб}} / I_{\text{ТУ}}$).

Таблица 5.19

Значения коэффициентов модели (5.26)

Максимально допустимая температура реле по ТУ	Вид нагрузки	Значения коэффициентов				
		A	N_T	G	N_S	H
До 85 °С включительно	Активная	0,1951	352	15,7	0,8	2
	Индуктивная				0,4	
> 85 °С до 125 °С	Активная	0,1919	377	10,4	0,8	2
	Индуктивная				0,4	

Значения коэффициента K_F в зависимости от числа коммутаций реле в час F при работе в составе РЭУ могут быть определены как

$$K_F = 0,1 \text{ при } F \leq 1, K_F = F/10 \text{ при } F > 1. \quad (5.27)$$

Значения коэффициента K_K , учитывающего влияние на надёжность реле количества задействованных контактов N (для негерметичных реле):

$$K_K = 0,42 + 0,24N. \quad (5.28)$$

Значение $\lambda_B^{(L)}$ и коэффициент $K_p^{(L)}$ определяют, как для дросселей.

Пьезоэлектрические приборы. Усреднённые значения коэффициента K_t можно рассчитать по модели

$$K_t = \exp[0,017(t_{\text{окр}} - 25)], \quad (5.29)$$

где $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С.

Предохранители, соединения, многослойные платы с металлизированными сквозными отверстиями. Значения коэффициента K_t рассчитывают по модели

$$K_t = 0,061t_{\text{окр}} - 0,525, \quad (5.30)$$

где $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, °С.

Кабели, шнуры, монтажные провода. Усреднённое значение коэффициента K_t определяют по математической модели:

$$K_t = \exp \left[E \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{t_p + 273} \right) \right], \quad (5.31)$$

где E – коэффициент, определяемый материалом изоляции кабельного изделия, может быть принят [11, 12]: 4570 – для монтажных проводов; 9862 – для радиочастотных кабелей, проводов; 11233 – для шнуров питания;

t_p – рабочая температура, °С.

Температура t_p складывается из двух составляющих:

$$t_p = t_{\text{окр}} + \Delta t_{\text{п}}, \quad (5.32)$$

где $\Delta t_{\text{п}}$ – перегрев, обусловленный потерей в кабеле (проводе) электрической или электромагнитной энергии.

$t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды;

Значения $\Delta t_{\text{п}}$ для шнуров питания и монтажных проводов могут быть найдены как

$$\Delta t_{\text{п}} = (t_{\text{max}} - 25)K_{\text{Н}}^2, \quad (5.33)$$

где t_{max} – максимальная рабочая температура шнура, провода по ТУ, °С;

$K_{\text{Н}}$ – коэффициент электрической нагрузки.

Коэффициент $K_{\text{Н}}$ определяют как отношение

$$K_{\text{Н}} = j/j_{\text{max}}, \quad (5.34)$$

где j – рабочая плотность тока в проводе,

j_{max} – максимально допустимая по ТУ плотность тока.

Плотность тока j_{max} в случае недостаточности данных может быть принята равной 3,5 А/мм² [17].

Должно выполняться условие $t_p \leq t_{\text{max}}$. В противном случае величина $K_{\text{Н}}$ должна быть уменьшена.

Значения максимальной рабочей температуры t_{max} для кабельных изделий РЭА широкого применения выбираются из табл. 5.20.

Таблица 5.20

Максимальная рабочая температура кабелей, шнуров, монтажных проводов (t_{max})

Группа кабельного изделия	Значение t_{max} , °С	Суммарное сечение токопроводящих жил, мм ²
1. Монтажные и соединительные низковольтные провода с поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией	70	0,08; 0,12; 0,20; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5

2. Монтажные и соединительные низковольтные провода с изоляцией из хлопчатобумажной пряжи или шёлка и поливинилхлорида	70	0,08; 0,12; 0,14; 0,20; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5
3. Монтажные и соединительные низковольтные провода с полиэтиленовой (ПЭ) изоляцией	85	0,08; 0,12; 0,20; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,5
4. Монтажные и соединительные низковольтные провода с двухслойной шелковой полиэтиленовой (ПЭ) изоляцией	100	0,08; 0,12; 0,20; 0,35; 0,5; 0,75; ...
5. Шнуры питания с ПВХ изоляцией	70	0,35; 0,5; 0,75
6. Шнуры питания с ПВХ изоляцией в ПВХ оболочке	70	0,5; 0,75; 1,0; 1,5
7. Шнуры питания гибкие с изоляцией и в оболочке из кремнийорганической резины	100	0,75; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0
8. Кабели радиочастотные со сплошной ПЭ изоляцией и в ПЭ или ПВХ оболочке	85	–

5.12. Значения коэффициента $K_Э$

В табл. 5.21 приводится классификация групп наземной аппаратуры в зависимости от условий эксплуатации, сделанная авторами пособия с учётом справочников и стандартов по надёжности России, США и Китая [10–13, 15]. Указывается также примерное соответствие выделенных групп военному стандарту России и справочнику по надёжности США. Для сравнения наземной аппаратуры с аппаратурой других категорий в табл. 5.21 приводится (последние две строки) характеристика условий эксплуатации, а в дальнейшем указываются значения $K_Э$ для бортовой, в частности самолётной аппаратуры.

Таблица 5.21

Классификация аппаратуры по условиям её эксплуатации

Условное обозначение группы аппаратуры	Характеристика аппаратуры и условий её эксплуатации	Примерное соответствие группе по документам других стран	
		ГОСТ РВ 20.39.304-98 (Россия)	MIL-HDBK-217F (США)
З	Наземная (эксплуатируемая на земле) аппаратура, общее обозначение	1	G
З _р	Стационарная аппаратура, эксплуатируемая в лабораторных условиях, капитальных жилых помещениях, помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями	1.1	G_B
З _{чр}	Стационарная аппаратура, эксплуатируемая в нерегулярно отапливаемых помещениях (объёмах), в производственных, в том числе вентилируемых подземных помещениях (шахтах); возможно частичное регулирование климатических условий	1.1	G_B, G_{MS}
З _{ов}	Стационарная аппаратура, эксплуатируемая под навесом или в неотапливаемых помещениях (объёмах), где климатические условия близки к условиям открытого воздуха	1.2	G_F

$Z_{ПН}$	Переносная аппаратура, эксплуатируемая в режиме стационарного применения в любых помещениях или под навесом (в условиях эксплуатации аппаратуры групп Z_p , $Z_{чр}$ и $Z_{ов}$)	1.10	G_F
Z_M	Мобильная аппаратура (носимая, подвижная), эксплуатируемая в любых помещениях, в том числе в кузовах и прицепах автомобилей, палатках или на открытом воздухе	1.3–1.9	G_M
$Z_{МД}$	Мобильная аппаратура, эксплуатируемая на железнодорожном транспорте, в кузовах и салонах автомашин и других механических транспортных средств	1.3–1.9	G_M
Б	Аппаратура самолётов и вертолётов, эксплуатируемая в воздушном пространстве (бортовая аппаратура), общее обозначение	3	A
$B_{СК}$	Аппаратура грузовых и пассажирских самолётов, эксплуатируемая в отсеках (салонах, кабинах), где находятся люди	3.2	A_{IC}

В табл. 5.22 приводятся приближённые (усреднённые) значения коэффициента $K_э$, для групп аппаратуры, указанных в табл. 5.21. Усреднение значений $K_э$ сделано по данным справочников СССР [10] и России [11, 12] с учётом стандарта Китая [15].

Таблица 5.22

Значения коэффициента $K_э$

Класс (группа элементов)	Группа аппаратуры в зависимости от условий эксплуатации						
	Z_p	$Z_{чр}$	$Z_{ов}$	$Z_{ПН}$	Z_M	$Z_{МД}$	$B_{СК}$
1. ИМС	1	1,2	1,5	1,7	2	3	3,5
2. ППП, включая оптоэлектронные:							
диоды, кроме диодов СВЧ	1	1,2	1,5	2	3	4	4
стабилитроны, ограничители напряжения	1	1,2	1,7	2,5	4	5	5
диоды СВЧ	1	1,2	1,3	1,5	2	2	3
транзисторы биполярные, кроме СВЧ	1	1,2	1,5	2	4	5	4
транзисторы биполярные СВЧ	1	1,2	2	2,5	4	5	5
транзисторы полевые, тиристоры	1	1,2	1,3	1,5	1,7	2	3
излучатели полупроводниковые (светодиоды), оптопары	1	1,1	1,3	1,5	2	2,5	6
фотодиоды, фоторезисторы, фототранзисторы	1	1,1	1,5	2	3	4	6
3. Знакосинтезирующие индикаторы (вакуумные люминесцентные, вакуумные накаливаемые, газоразрядные, полупроводниковые)	1	1,1	1,3	1,5	2	2,5	6
4. Пьезоэлектрические приборы, электромеханические фильтры	1	1,1	1,3	1,5	1,7	2	2
5. Резисторы:							
постоянные непроволочные	1	1,2	1,5	2	3	5	6
постоянные проволочные и фольговые	1	1,2	1,5	2	3	5	10
переменные непроволочные	1	1,5	2	2,5	4	6	8
переменные проволочные	1	1,5	2	2,5	4	5	5
резисторные микросхемы, сборки	1	1,2	1,5	2	3	5	6
терморезисторы	1	1,2	1,5	2	3	5	6

6. Конденсаторы:							
керамические, стеклянные, слюдяные, тонкоплёночные с неорганическим диэлектриком	1	1,1	1,3	1,5	3	5	4
с органическим диэлектриком, бумажные	1	1,2	1,3	1,5	3	5	4
оксидно-электролитические	1	1,2	1,5	2	3	5	5
оксидно-пористые	1	1,2	1,5	2	3	5	5
подстроечные	1	1,5	2	2,5	4	6	5
7. Трансформаторы	1	1,3	1,6	2	3	5	10
8. Дроссели, катушки индуктивности	1	1,3	1,6	2	3	5	10
9. Линии задержки	1	1,2	2	3	3	5	10
10. Коммутационные изделия:							
тумблеры, кнопки; переключатели кнопочные, галетные, программные и движковые, переключатели на базе герконов	1	1,5	2	2,5	2,7	3	5
микрпереключатели	1	1,7	2,5	3	4	5	10
контакты магнитоуправляемые	1	1,7	2,5	5	10	16	50

Окончание табл. 5.22

Класс (группа элементов)	Группа аппаратуры в зависимости от условий эксплуатации						
	З _Р	З _{ЧР}	З _{ОВ}	З _{ПН}	З _М	З _{МД}	БСК
11. Соединители низкочастотные	1	1,2	1,3	1,5	2	3	3
12. Соединители радиочастотные	1	1,2	1,3	1,5	2	3	3
13. Реле:							
электромагнитные средней мощности и слаботочные	1	1,5	2,5	4	5	6	8
реле и автоматы защиты, выключатели и переключатели автоматические и т.п.	1	1,1	1,3	1,5	1,7	2	4
14. Электрические кабели, шнуры, провода	1	1	1,2	1,5	2	3	7
15. Соединения (пайка, сварка, скрутка и т.д.)	1	1,2	1,7	2	3	4	5
16. Пайки на платах с металлизированными отверстиями	1	1,2	1,7	2	3	4	5
17. Установочные изделия (предохранители, держатели предохранителей)	1	1,2	1,7	2	4	8	9
18. Прочие элементы:							
электронно-лучевые трубки	1	1	1,3	1,5	1,7	2	4
индикаторные лампочки	1	1,2	2	3	3,5	4,5	6

5.13. Значения коэффициента $K_{П}$

Коэффициентом приёмки $K_{П}$ принимаются во внимание следующие виды приёмки элементов в условиях производства:

- приёмка «1» – приёмка отдела технического контроля предприятий: элементы массового применения;
- приёмка «3» – приёмка отдела технического контроля предприятий: элементы по заказам министерств и ведомств;
- приёмка «5» – общее военное применение (ОВП, ВП);

- приёмка «7» – элементы особой стабильности, выпускаемые малыми партиями (ОСМ);
- приёмка «9» – элементы особой стабильности и повышенной надёжности (ОС);
- коммерческий или неизвестный уровень качества.

Усреднённые значения коэффициента K_{Π} в зависимости от вида приёмки элементов различных классов и групп приведены в табл. 5.23. Для элементов с приёмкой «5» значение K_{Π} принято равным 1. Для других видов приёмки приближённые (экстраполированные) значения K_{Π} определены по данным работ [10–13, 15, 16].

Значения коэффициента $K_{П}$

Класс (группа) элементов	Значения $K_{П}$ для видов приёмки:						
	неизвестный вид приёмки (уровень качества)	ОТК			«5» (ВП, ОВП)	«7» (ОСМ)	«9» (ОС)
		«1»		«3»			
		пластмассовые корпуса (только для ППП)	–				
1. ИМС	10	–	5,5	3,1	1	0,5	0,3
2. ППП, включая оптоэлектронные:							
диоды НЧ (общего назначения, переключательные, выпрямительные, стабилитроны и др.)	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,35
диоды СВЧ, кроме диодов Шоттки	50	50	25	5	1	0,6	0,6
диоды СВЧ Шоттки		–	2,5	1,8	1	0,5	0,5
транзисторы: биполярные, Si полевые, однопереходные	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,35
транзисторы СВЧ биполярные и полевые, включая арсенидогаллиевые	10	–	5	2	1	0,5	0,35
транзисторы: НЧ малошумящие, ВЧ ($f > 400$ МГц), Si полевые	10	–	5	2	1	0,5	0,35
тиристоры Si	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,2
оптоэлектронные ППП	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,6
3. Знакосинтезирующие индикаторы:							
полупроводниковые	10	8	5,5	2,4	1	0,7	0,6
люминесцентные	4	–	2	1,5	1	–	–
накаливаемые	5	–	3	2	1	–	–
газоразрядные	4	–	2	1,5	1	0,8	0,8
жидкокристаллические цифровые	10	–	5,5	3	1	–	–
4. Пьезоэлектрические приборы:							
кварцевые резонаторы	10	–	9	3	1	–	–
прочие приборы	10	–	4	2	1	0,7	0,7
5. Резисторы:							
переменные непроволочные, композиционные и пленочные	10	–	5	3	1	0,8	0,8
потенциометры непроволочные	10	–	5	3	1	–	–
остальные постоянные и переменные резисторы	10	–	3	2	1	0,5	0,3
6. Конденсаторы	10	–	5	3	1	0,5	0,3
7. Трансформаторы:							
питания	30	–	20	10	1	0,5	0,2
ВЧ (радиочастотные)	20	–	10	5	1	0,5	0,2
НЧ, звуковые	10	–	5	3	1	0,4	0,2
импульсные	10	–	4	2	1	0,3	0,2
8. Дроссели, катушки индуктивности:							
все дроссели, кроме питания	10	–	5	3	1	0,5	0,2
дроссели питания	20	–	10	5	1	0,5	0,2
катушки индуктивности	10	–	5	3	1	0,5	0,2
9. Линии задержки	5	–	4	2,1	1	0,5	0,2

Класс (группа) элементов	Значения $K_{П}$ для видов приёмки						
	неизвестный вид приёмки (уровень качества)	ОТК			«5» (ВП, ОВП)	«7» (ОСМ)	«9» (ОС)
		«1»		«3»			
		пластмассовые корпуса (только для ППП)	–				
10. Коммутационные изделия:							
тумблеры, кнопочные переключатели	15	–	3	2	1	0,5	0,2
галетные переключатели	15	–	3	2	1	0,5	0,2
схемные выключатели, прерыватели (ручные и автоматические, магнитные, тепловые и др.)	15	–	8,4	3	1	0,5	0,2
11. Соединители НЧ	5	–	2,5	1,5	1	0,5	0,5
12. Соединители радиочастотные	5	–	2,5	1,5	1	0,5	0,5
13. Реле	9	–	3	1,5	1	0,5	0,2
14. Кабели, шнуры, провода монтажные	5	–	2	1,5	1	0,8	0,8
15. Соединения:							
пайка припоем	–	–	5	3	1	1	1
сварка	–	–	20	5	1	1	1
16. Паяные соединения на ПП с металлизированными отверстиями	–	–	5	3	1	1	1
17. Предохранители, держатели предохранителей	20	–	15	7	1	0,5	0,2
18. ЭЛТ приёмные, кроме осциллографических без запоминания	5	–	3	2	1	–	–
19. ЭЛТ приёмные, осциллографические без запоминания	5	–	3	2	1	0,8	0,8
20. Кинескопы	5	–	3	2	1	–	–
21. Индикаторные лампочки	5	–	3	2	1	1	1

6. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНОСТРАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

6.1. Общая характеристика моделей и описание их коэффициентов

Для получения моделей, используемых для расчёта (прогнозирования) эксплуатационной интенсивности отказов λ_3 элементов иностранного производства, применены принципы, описанные в подразд. 5.1 для элементов производства стран СНГ.

Коэффициенты, входящие в математические модели расчёта эксплуатационной интенсивности отказов разных классов элементов, условно можно разделить на две группы (табл. 6.1):

- первая группа коэффициентов является общей для моделей большинства классов (групп) элементов и характеризует режимы и условия их эксплуатации, уровень качества элементов;

• вторая группа коэффициентов включается в модели конкретных классов (групп) элементов и характеризует зависимость эксплуатационной интенсивности их отказов от конструктивных, функциональных и технологических особенностей элементов.

Таблица 6.1

Пояснения коэффициентов, входящих в математические модели

Условное обозначение и название коэффициента	Факторы, учитываемые коэффициентом
Коэффициенты, входящие в модели для всех классов элементов	
K_t – коэффициент температурного режима	Значение температуры элемента
K_S – коэффициент электрического режима	Электрическая нагрузка – коэффициент нагрузки K_H
K_E – коэффициент эксплуатации ¹	Степень жёсткости условий эксплуатации РЭУ
K_Q – коэффициент качества (аналог коэффициента приёмки K_{II})	Уровень качества – степень жёсткости требований к контролю качества и правила приёмки элементов в условиях производства
Коэффициенты, входящие в модели для интегральных микросхем (ИМС)	
K_L	Продолжительность промышленного производства ИМС
K_Φ	Функциональное назначение ИМС
K_{II}	Процесс изготовления ИМС
$K_{кр}$	Сложность кристалла
$K_{корп}$	Тип корпуса
Коэффициенты, входящие в модели для полупроводниковых приборов	
K_K	Конструкция контактов НЧ диодов
K_Φ	Функциональное назначение прибора
K_D	Максимально допустимая по ТУ нагрузка по мощности (току)
K_U	Коэффициент, зависящий от отношения рабочего напряжения к максимально допустимому по ТУ (коэффициента нагрузки по напряжению)
Коэффициенты, входящие в модели для оптоэлектронных ППП	
K_I	Максимально допустимое по технической документации пиковое значение прямого тока
K_Φ	Функциональное назначение прибора для лазерных диодов
K_S	Величина электрической нагрузки для лазерных диодов
Составляющие, входящие в модели для резисторов	
K_R	Значение номинального сопротивления
K_P	Значение мощности рассеивания в рабочем режиме
Составляющие, входящие в модели для конденсаторов	
K_C	Значение номинальной ёмкости
K_{SR}	Последовательное активное сопротивление между конденсатором и шиной питания (для оксидно-полупроводниковых конденсаторов)

Примечание. ¹ Выбор коэффициента K_E рассмотрен в подразд. 6.6.

Ниже приводятся математические модели, позволяющие выполнить прогнозирование эксплуатационной безотказности некоторых классов и групп

элементов иностранного производства (табл. 6.2). При систематизации и уточнении этих моделей в основу были положены руководства справочников и стандартов США, Франции и Китая [13–15].

6.2. Интегральные микросхемы

Расчёт эксплуатационной интенсивности отказов λ_{Σ} отдельных групп ИМС выполняется по математическим моделям табл. 6.2.

Таблица 6.2

Модели прогнозирования λ_{Σ} ИМС

Группа ИМС	Вид математической модели	Номер формулы
1. Микросхемы цифровые 2. Микросхемы аналоговые 3. Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) 4. Микропроцессоры	$\lambda_{\Sigma} = (\lambda_{кр} \cdot K_t + \lambda_{корп} \cdot K_E) \cdot K_Q \cdot K_L$	(6.1)
5. Микросхемы памяти	$\lambda_{\Sigma} = (\lambda_{кр} \cdot K_t + \lambda_{корп} \cdot K_E + \lambda_{Ц}) \cdot K_Q \cdot K_L$	(6.2)
6. Микросхемы GaAs СВЧ (GaAs ММИС) ИМС арсенидогаллиевые на основе полевых транзисторов и металлизации золотом	$\lambda_{\Sigma} = (\lambda_{кр} \cdot K_t \cdot K_{\Phi} + \lambda_{корп} \cdot K_E) \cdot K_Q$	(6.3)
7. ИМС сверхбольшой степени интеграции (более 60 000 логических ячеек – вентиляей)	$\lambda_{\Sigma} = (\lambda_{кр} K_{И} K_t K_{кр} + \lambda_{корп} K_{корп}) K_E K_Q + \lambda_{эл}$	(6.4)
8. Микросхемы ПАВ	$\lambda_{\Sigma} = 2,1 \cdot 10^{-6} \cdot K_E \cdot K_Q$	(6.5)

Примечание. $\lambda_{кр}$ – интенсивность отказов ИМС, обусловленная кристаллом; $\lambda_{корп}$ – интенсивность отказов ИМС, связанная с отказами корпуса; $\lambda_{Ц}$ – интенсивность отказов, обусловленная циклами записи/считывания; $\lambda_{эл}$ – интенсивность отказов, обусловленная чувствительностью к электростатическим разрядам.

Модель (6.1) распространяется на следующие группы ИМС: цифровые ИС биполярной технологии; аналоговые ИС биполярной технологии; программируемые логические ИС (матрицы) биполярной технологии; цифровые ИС МОП технологии; аналоговые ИС МОП технологии; программируемые логические ИС МОП технологии; микропроцессоры биполярной технологии; микропроцессоры МОП технологии.

Модель (6.2) используется для следующих групп ИМС памяти: ПЗУ МОП технологии; ППЗУ МОП технологии; РПЗУ с ультрафиолетовым и РПЗУ с электрическим стиранием; динамические ОЗУ МОП технологии; статические ОЗУ МОП и комбинированной технологии; ПЗУ, ППЗУ биполярной технологии; статические ОЗУ биполярной технологии.

Модель (6.3) используется для следующих групп арсенидогаллиевых ИС: цифровые; полупроводниковые СВЧ диапазона.

Интенсивности отказов $\lambda_{кр}$, $\lambda_{корп}$ для ИМС (кроме ИМС сверхбольшой степени интеграции) могут быть определены по данным табл. 6.3–6.7.

Таблица 6.3

Значения интенсивности отказов $\lambda_{кр}$ для цифровых ИС, аналоговых ИС и ПЛИС

Группа ИМС	$\lambda_{кр}, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$	Значение N
1. Биполярные цифровые	$\lambda_{кр} = 0,0025$ $\lambda_{кр} = 0,000163 \cdot N^{0,6}$	от 1 до 100 от 101 до 60 000
2. Биполярные аналоговые	$\lambda_{кр} = 0,010$ $\lambda_{кр} = 0,0174 \cdot \ln N - 0,06$	от 1 до 100 от 101 до 10 000
3. ПЛИС	$\lambda_{кр} = 0,010$ $\lambda_{кр} = 0,00216 \cdot N^{0,43}$	до 200 от 201 до 5000
4. МОП цифровые	$\lambda_{кр} = 0,010$ $\lambda_{кр} = 0,00111 \cdot N^{0,54}$	от 1 до 100 от 101 до 60 000
5. МОП аналоговые	$\lambda_{кр} = 0,010$ $\lambda_{кр} = 0,0174 \cdot \ln N - 0,06$	от 1 до 100 от 101 до 10 000
6. ПЛИС МОП технологии	$\lambda_{кр} = 0,00085$ $\lambda_{кр} = 0,0022 \cdot \ln N - 0,0119$	до 500 от 501 до 20 000

Примечание. N – количество базовых ячеек (вентилей) для цифровых ИС и ПЛИС, количество транзисторов – для аналоговых ИС.

Таблица 6.4

Значения интенсивности отказов $\lambda_{кр}$ для микропроцессоров

Разрядность, бит	$\lambda_{кр}, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$	
	Биполярные	МОП
до 8	0,060	0,14
до 16	0,12	0,28
до 32	0,24	0,56

Таблица 6.5

Значения $\lambda_{кр}$ для ИМС памяти, $\times 10^{-6} \text{ 1/ч}$

Объём памяти B , бит	ИМС КМОП технологии				Биполярные ИМС	
	ПЗУ	ППЗУ, РПЗУ	Динамические ОЗУ	Статические ОЗУ	ПЗУ, ППЗУ	Статические ОЗУ
до 16 К	0,00065	0,00085	0,0013	0,0078	0,0094	0,0052
$16 < B \leq 64 \text{ К}$	0,0013	0,0017	0,0025	0,016	0,019	0,11
$64 \text{ К} < B \leq 256 \text{ К}$	0,0026	0,0034	0,0050	0,031	0,38	0,21
$256 < B \leq 1 \text{ М}$	0,0052	0,0068	0,0100	0,062	0,75	0,42

Таблица 6.6

Значение интенсивности отказов $\lambda_{кр}$ для арсенидогаллиевых ИС

СВЧ (ММИС)		Цифровые на MESFET транзисторах	
Сложность ИС, количество активных элементов	$\lambda_{кр}, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$	Сложность ИС, количество активных элементов	$\lambda_{кр}, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$
1 до 100	4,5	1 до 1000	25
101 до 1000	7,2	1001 до 10000	51

Таблица 6.7

Определение интенсивности отказов $\lambda_{\text{корп}}$ в зависимости от числа выводов n

Тип корпуса	$\lambda_{\text{корп}}, \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$
1. Герметизированные DIP, PGA, SMT	$\lambda_{\text{корп}} = 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot n^{1,08}$
2. DIP со стеклянной изоляцией	$\lambda_{\text{корп}} = 9,0 \cdot 10^{-5} \cdot n^{1,51}$
3. Плоский с аксиальными выводами	$\lambda_{\text{корп}} = 3,0 \cdot 10^{-5} \cdot n^{1,82}$
4. Металлический (Can)	$\lambda_{\text{корп}} = 3,0 \cdot 10^{-5} \cdot n^{2,01}$
5. Негерметизированные DIP, PGA, SMT	$\lambda_{\text{корп}} = 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot n^{1,08}$

Примечания: 1. n – число выводов.

2. SMT – корпуса для поверхностного монтажа: Small Outline (SO, SOIC, SOP, SOJ, WSOP, SSOP, TSOP, TSSOP и др.); Flatpack (QFP, TQFP и др.); Leaded Chip Carrier (LCC); Ball Grid Array (BGA) и др.

Интенсивность отказов, связанная с циклами записи/считывания, $\lambda_{\text{Ц}} = 0$ для всех ИМС памяти, кроме РПЗУ с электрическим стиранием, для которых $\lambda_{\text{Ц}}$ определяют по данным табл. 6.8.

Таблица 6.8

Расчёт интенсивности отказов $\lambda_{\text{Ц}}$ для РПЗУ

Параметр, коэффициент	Формула, значение	Пояснение
$\lambda_{\text{Ц}}$	$\lambda_{\text{Ц}} = A_1 B_1 K_{\text{ош}}$	$A_1, B_1, K_{\text{ош}}$ – коэффициенты
A_1	$A_1 = 6,817 C \cdot 10^{-12}$	C – количество циклов запись/считывание
B_1	$B_1 = \left(\frac{S}{16000} \right)^{0,5} \exp \left[\frac{-0,15}{8,617 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{\text{кр}} + 273} - \frac{1}{333} \right) \right]$	S – количество бит (1 К = 1024 бит); $T_{\text{кр}}$ – температура кристалла
$K_{\text{ош}}$	$K_{\text{ош}} = 1$ (не встроена в кристалл) $K_{\text{ош}} = 0,72$ (встроена в кристалл) $K_{\text{ош}} = 0,68$ (избыточно, 2 в 1)	$K_{\text{ош}}$ – коэффициент, учитывающий наличие в составе ИМС системы коррекции ошибок

Для получения интенсивностей отказов $\lambda_{\text{кр}}$, $\lambda_{\text{корп}}$, $\lambda_{\text{эл}}$ для ИМС сверхбольшой степени интеграции используют табл. 6.9.

Таблица 6.9

Интенсивности отказов $\lambda_{\text{кр}}$, $\lambda_{\text{корп}}$, $\lambda_{\text{эл}}$ для ИМС сверхбольшой степени интеграции

Интенсивность отказов	Формула, значение	Пояснение
$\lambda_{\text{кр}}$	$\lambda_{\text{кр}} = 0,16 \cdot 10^{-6}, \text{ 1/ч}$	Для логических ИМС
	$\lambda_{\text{кр}} = 0,24 \cdot 10^{-6}, \text{ 1/ч}$	Для матриц логических элементов и памяти
$\lambda_{\text{корп}}$	$\lambda_{\text{корп}} = (0,0022 + 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot n) \times 10^{-6}, \text{ 1/ч}$	n – количество выводов корпуса
$\lambda_{\text{эл}}$	$\lambda_{\text{эл}} = \frac{-\ln[1 - 0,00057 \exp(-0,0002V)]}{0,00876} \times 10^{-6}, \text{ 1/ч}$	V – чувствительность к электростатическим разрядам

Примечание. В формуле определения $\lambda_{\text{эл}}$ при неизвестном значении V использовать значение $V = 0 \dots 1000 \text{ В}$.

Коэффициент, учитывающий влияние температуры K_t , может быть получен по моделям, приведённым в табл. 6.10.

Таблица 6.10

Расчет коэффициента режима K_t

Группа изделий	E_a	K_t
Цифровые биполярной технологии	0,40	$K_t = 0,1 \exp \left[\frac{-E_a}{8,617 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{кр} + 273} - \frac{1}{298} \right) \right]$
Цифровые МОП технологии	0,35	
Аналоговые биполярной и МОП технологий	0,65	
Микросхемы памяти	0,60	
Арсенидогаллиевые (GaAs) СВЧ	1,50	$K_t = 0,1 \exp \left[\frac{-E_a}{8,617 \cdot 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{кр} + 273} - \frac{1}{423} \right) \right]$
Арсенидогаллиевые цифровые (GaAs) на MESFET транзисторах	1,40	

Примечание. E_a – энергия активации, эВ; $T_{кр}$ – температура кристалла (перехода кристалл – корпус для Si приборов или средняя температура канала – для GaAs приборов), °С.

Температуру $T_{кр}$ определяют как

$$T_{кр} = T_{корп} + R_{кр-корп}P, \quad (6.6)$$

где $T_{корп}$ – температура корпуса ИМС, °С;

$R_{кр-корп}$ – тепловое сопротивление кристалл – корпус, °С/Вт;

P – фактическая рассеиваемая мощность ИМС в рабочем режиме.

В качестве $T_{корп}$ следует брать максимальную температуру с учётом работы ИМС в составе РЭС. В случае невозможности определить значение P , используемое в формуле (6.6), рекомендуется брать информацию о максимальной рассеиваемой мощности рассматриваемой или равноценных ИМС. Если неизвестно значение $R_{кр-корп}$, то следует воспользоваться данными равноценных ИМС или же табл. 6.11.

Таблица 6.11

Выбор значения $R_{кр-корп}$ (для ИМС в керамических корпусах)

Корпус ИМС	Значение $R_{кр-корп}$ (°С/Вт) при площади кристалла	
	$> 9,29 \text{ мм}^2$	$\leq 9,29 \text{ мм}^2$
Типа 2 (Dual-in-Line)	11	28
Типа 4 (Flat Package)	10	22
Chip Carrier	10	20
Pin Grid Array (PGA)	10	20
Can (металлический)	–	70
Organic Material Pack		80

Коэффициент K_L , учитывающий продолжительность промышленного изготовления ИМС, может быть подсчитан по модели

$$\left. \begin{aligned} K_L &= 0,01 \exp(5,35 - 0,35L) \text{ при } L < 2,0; \\ K_L &= 1 \text{ при } L \geq 2, \end{aligned} \right\} \quad (6.7)$$

где L – продолжительность в годах промышленного выпуска ИМС данного типа.

Значения коэффициента K_{Φ} модели (6.3) и коэффициента $K_{\text{корп}}$ модели (6.4) выбирают из табл. 6.12, 6.13.

Таблица 6.12
Выбор коэффициента K_{Φ}

Функциональное назначение	K_{Φ}
Полупроводниковые СВЧ: <i>малошумящие, маломощные мощные (> 100 мВт) неизвестно</i>	1 3 3
Цифровые всех функциональных назначений	1

Таблица 6.13
Коэффициент $K_{\text{корп}}$ для СБИС

Тип корпуса	Значения $K_{\text{корп}}$	
	Герметичный	Негерметичный
DIP	1	1,3
PGA	2,2	2,9
SMT	4,7	6,1

Рекомендуемые значения коэффициента $K_{\text{И}}$ модели (6.4):

0,55 – при изготовлении с использованием процессов QML или QPL,

2 – при использовании других процессов.

Коэффициент $K_{\text{кр}}$ модели (6.4) может быть подсчитан по формуле

$$K_{\text{кр}} = 0,36 + \left[0,64 \left(\frac{S_{\text{кр}}}{0,21} \right) \left(\frac{2}{x_s} \right)^2 \right], \quad (6.8)$$

где $S_{\text{кр}}$ – площадь кристалла в см²;

x_s – топологический размер в микронах.

Значения коэффициента K_Q , учитывающего влияние уровня качества изготовления ИМС, приводятся в табл. 6.14 (все ИМС, кроме микросхем ПАВ) и табл. 6.15 (микросхемы ПАВ).

Таблица 6.14

Значения коэффициента K_Q для всех ИМС, кроме микросхем ПАВ

Уровень качества изготовления ИМС		Примерное соответствие виду приёмки в странах СНГ
Характеристика по справочникам и стандартам США	K_Q	
1. Класс <i>S</i> в соответствии с MIL-M-38510	0,25	«9» (ОС)
2. Класс <i>B</i> в соответствии с MIL-M-38510	1,0	«5» (ВП, ОВП)
3. Класс <i>B</i> ₁ в соответствии со стандартом MIL-STD-883, разд. 1.2.1	2,0	«5» (ВП, ОВП)
4. Более низкий уровень качества, нежели класс <i>B</i> ₁	3,1	«3» (ОТК)
5. Более низкий уровень качества, нежели класс <i>B</i> ₁	5,5	«1» (ОТК)
6. Коммерческий уровень или уровень неизвестен	10	«1» (ОТК)

Таблица 6.15

Значения коэффициента качества изготовления K_Q для интегральных микросхем ПАВ

Уровень качества ИС	K_Q
1. Протестированные 10 температурными циклами (от –55 до +125°C) при электрической нагрузке (примерно соответствует приёмке «5»)	0,1
2. Более низкий уровень качества (примерно соответствует приёмке «1»)	1,0

6.3. Полупроводниковые приборы

Расчёт эксплуатационной интенсивности отказов λ_{Σ} отдельных групп ППП выполняется по математическим моделям табл. 6.16.

Таблица 6.16

Математические модели расчёта λ_{Σ} полупроводниковых приборов

Группа изделий	Вид математической модели
1. Диоды низкочастотные	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_t \cdot K_S \cdot K_K \cdot K_Q \cdot K_E$
2. Диоды высокочастотные	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_t \cdot K_{\Phi} \cdot K_D \cdot K_Q \cdot K_E$
3. Транзисторы биполярные низкочастотные (частота менее 200 МГц)	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_t \cdot K_{\Phi} \cdot K_D \cdot K_S \cdot K_Q \cdot K_E$
4. Транзисторы полевые низкочастотные (р- и n-канальные кремниевые, частота менее 400 МГц)	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_t \cdot K_{\Phi} \cdot K_Q \cdot K_E$
5. Транзисторы однопереходные	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_t \cdot K_Q \cdot K_E$
6. Транзисторы биполярные высокочастотные малой и средней мощности, в том числе малошумящие, частота более 200 МГц, мощность менее 1 Вт	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_t \cdot K_D \cdot K_S \cdot K_Q \cdot K_E$
7. Транзисторы биполярные высокочастотные (СВЧ) большой мощности, средняя мощность более 1 Вт	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_t \cdot K_{\Phi} \cdot K_m \cdot K_Q \cdot K_E$
8. Транзисторы полевые высокочастотные арсенидогаллиевые малой и средней мощности	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_t \cdot K_{\Phi} \cdot K_m \cdot K_Q \cdot K_E$
9. Транзисторы полевые высокочастотные арсенидогаллиевые большой мощности, частота более 1 ГГц	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_t \cdot K_{\Phi} \cdot K_m \cdot K_Q \cdot K_E$
10. Транзисторы полевые высокочастотные кремниевые	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_t \cdot K_Q \cdot K_E$
11. Тиристоры	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_t \cdot K_D \cdot K_S \cdot K_Q \cdot K_E$

Примечание. λ_B – базовая интенсивность отказов.

Значения базовой интенсивности отказов λ_B приведены в табл. 6.17. Коэффициенты K_t моделей табл. 6.16 определяются с помощью табл. 6.18, 6.19.

Таблица 6.17

Справочные данные λ_B ППП

Группа изделий	$\lambda_B \times 10^{-6}$ 1/ч
1. Диоды низкочастотные: <i>диоды выпрямительные общего назначения</i> <i>диоды выпрямительные мощные быстро восстановления</i> <i>диоды выпрямительные мощные (в т.ч. Шоттки)</i> <i>диоды импульсные</i> <i>защитные диоды (супрессоры) / варисторы</i> <i>регуляторы тока</i> <i>стабилитроны</i>	0,0038 0,025 0,003 0,001 0,0013 0,0034 0,002
2. Диоды высокочастотные (СВЧ): <i>диоды лавинно-пролетные</i> <i>диоды Ганна</i> <i>диоды туннельные и обращенные (включая смесительные и детекторные)</i> <i>диоды PIN</i> <i>диоды с барьером Шоттки (включая детекторные)</i> <i>варакторы (варикапы) и диоды с накоплением заряда</i>	0,22 0,18 0,0023 0,0081 0,027 0,0025
3. Транзисторы биполярные низкочастотные	0,00074

Группа изделий	$\lambda_B \times 10^{-6}$ 1/ч
4. Транзисторы полевые низкочастотные: <i>МОП (MOSFET)</i> <i>с p-n-переходом (JFET)</i>	0,012 0,0045
5. Транзисторы однопереходные	0,0083
6. Транзисторы биполярные высокочастотные малой и средней мощности	0,18
7. Транзисторы биполярные СВЧ большой мощности	по формуле (6.9) ¹
8. Транзисторы полевые высокочастотные арсенидогаллиевые малой и средней мощности, мощность менее 0,1 Вт, частота $1 < F < 10$ ГГц	0,052
9. Транзисторы полевые СВЧ арсенидогаллиевые большой мощности, частота $4 \leq F \leq 10$ ГГц, мощность $0,1 \leq P \leq 6$ Вт	по формуле (6.10) ²
10. Транзисторы полевые высокочастотные кремниевые: <i>МОП (MOSFET)</i> <i>с p-n-переходом (JFET)</i>	0,06 0,023
11. Тиристоры	0,0022

Примечания: ¹ Значение интенсивности отказов λ_B вычисляется по формуле

$$\lambda_B = 0,032 \cdot e^{0,354 \cdot F} + 0,00558 \cdot P. \quad (6.9)$$

² Значение интенсивности отказов λ_B вычисляется по формуле

$$\lambda_B = 0,0093 \cdot e^{0,429 \cdot F} + 0,486 \cdot P, \quad (6.10)$$

где F – рабочая частота, ГГц,

P – средняя выходная мощность (по документации), Вт.

Таблица 6.18

Расчет коэффициента режима K_T в зависимости от температуры перехода для всех ППП, кроме транзисторов биполярных СВЧ большой мощности

Группа изделий	Формула, пояснения	B_a
Диоды низкочастотные: <i>все, кроме регуляторов тока и стабилитронов</i> <i>регуляторы тока, стабилитроны</i>	$K_T = e^{-B_a \left(\frac{1}{T_{\Pi} + 273} - \frac{1}{298} \right)}$ T_{Π} – температура перехода; B_a – коэффициент	3091 1925
Диоды высокочастотные: <i>все, кроме диодов лавинно-пролётных</i> <i>диоды лавинно-пролётные</i>		2100 5260
Транзисторы биполярные низкочастотные		2114
Транзисторы полевые низкочастотные		1925
Транзисторы однопереходные		2483
Транзисторы биполярные высокочастотные малой и средней мощности		2114
Транзисторы полевые высокочастотные арсенидогаллиевые		4485
Транзисторы полевые высокочастотные кремниевые		1925
Тиристоры		3082

Таблица 6.19

Расчёт коэффициента режима K_t в зависимости от температуры перехода для биполярных высокочастотных транзисторов большой мощности

Коэффициент нагрузки по напряжению S	Модель определения K_t	
	Металлизация золотом	Металлизация алюминием
$S \leq 0,4$	$K_t = 0,1 e^{-2903 \left(\frac{1}{T_{\Pi} + 273} - \frac{1}{373} \right)}$	$K_t = 0,38 e^{-5794 \left(\frac{1}{T_{\Pi} + 273} - \frac{1}{373} \right)}$
$0,4 < S \leq 0,55$	$K_t = 2(S - 0,35) e^{-2903 \left(\frac{1}{T_{\Pi} + 273} - \frac{1}{373} \right)}$	$K_t = 7,55(S - 0,35) e^{-5794 \left(\frac{1}{T_{\Pi} + 273} - \frac{1}{373} \right)}$

Примечание. S – коэффициент электрической нагрузки по напряжению; T_{Π} – пиковое значение температуры перехода, °С.

Температура перехода T_{Π} (см. табл. 6.18, 6.19) вычисляется по выражению

$$T_{\Pi} = T_{\text{окр}} + R_{\text{кр-окр}} \cdot P = T_{\text{корп}} + R_{\text{кр-корп}} \cdot P, \quad (6.11)$$

где $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды; °С;

$T_{\text{корп}}$ – температура корпуса прибора, °С;

$R_{\text{кр-окр}}$ – тепловое сопротивление «кристалл – окружающая среда»; °С/Вт;

$R_{\text{кр-корп}}$ – тепловое сопротивление «кристалл – корпус»; °С/Вт;

P – фактическая мощность рассеяния прибора, Вт.

Значения тепловых сопротивлений берутся из спецификации на изделия.

Коэффициенты K_K , K_D , K_F , K_M и K_S моделей табл. 6.16 определяются с помощью табл. 6.20–6.24.

Таблица 6.20

Значения коэффициента K_K в зависимости от конструкции контактов низкочастотных диодов

Конструкция контактов	K_K
Контакты паяные (сварные)	1
Контакты пружинные	2
Конструкция неизвестна	2

Таблица 6.21

Расчет коэффициента K_D в зависимости от максимально допустимой мощности (тока) прибора

Группа изделий	Мощность, Вт	K_D
1. Диоды СВЧ, кроме PIN-диодов		$K_D = 1,0$
2. PIN-диоды		$K_D = 0,362 \cdot \ln(P_{\text{max}}) - 0,25$
3. Транзисторы биполярные низкочастотные и биполярные высокочастотные малой и средней мощности	$\leq 0,1$	$K_D = 0,43$
	$> 0,1$	$K_D = (P_{\text{max}})^{0,37}$
4. Тиристоры		$K_D = (I_{\text{пр.ср max}})^{0,4}$

Примечание. P_{max} – максимально допустимая рассеиваемая мощность, Вт; $I_{\text{пр.ср max}}$ – максимально допустимый средний прямой ток, А.

Таблица 6.22

Значения коэффициента K_{Φ}
в зависимости от функционального назначения прибора

Группа изделий	Функциональный режим работы	K_{Φ}
Диоды СВЧ, кроме варакторов	–	1
Варакторы	Регулируемый напряжением	0,5
	Умножения частоты	2,5
Транзисторы биполярные низкочастотные	Линейного усиления	1,5
	Переключения	0,7
Транзисторы полевые низкочастотные	Переключение слабого сигнала	0,7
	Линейного усиления ($P < 2$ Вт)	1,5
	Усиления ($P \geq 2$ Вт):	
	$2 \leq P < 5$ Вт	2
	$5 \leq P < 50$ Вт	4
	$50 \leq P < 250$ Вт	8
Транзисторы биполярные СВЧ большой мощности	Непрерывный режим	7,6
	Импульсный режим	$K_{\Phi} = 0,06 \cdot (D, \%) + 0,4$
	Импульсный режим	1
Транзисторы полевые высокочастотные арсенидогаллиевые	Непрерывный режим	4
	Импульсный режим	1

Примечание. D – величина, обратная скважности импульсов (коэффициент заполнения), %.

Таблица 6.23

Расчет коэффициента K_S в зависимости от электрической нагрузки ППП

Группа изделий	Нагрузка по напряжению S	K_S	Пояснение
Диоды низкочастотные, кроме стабилизаторов, регуляторов тока и варисторов, защитных диодов (супрессоров)	от 0 до 0,3	$K_S = 0,054$	$S = \frac{U_{\text{обр.раб}}}{U_{\text{обр.мах}}}$
	$> 0,3$ до 1	$K_S = S^{2,43}$	
Стабилизаторы, регуляторы тока и варисторы, защитные диоды (супрессоры)	от 0 до 1	$K_S = 1$	$S = \frac{U_{\text{кэ.раб}}}{U_{\text{кэ.мах}}}$
Транзисторы биполярные низкочастотные и биполярные высокочастотные малой и средней мощности	от 0 до 1	$K_S = 0,045 \cdot e^{3,1 \cdot S}$	
Тиристоры	От 0 до 0,3	$K_S = 0,1$	$S = \frac{U_{\text{кэ.раб}}}{U_{\text{кэ.мах}}}$
	$> 0,3$ до 1	$K_S = S^{1,9}$	

Примечание. $U_{\text{обр.раб}}$ – постоянное обратное рабочее напряжение; $U_{\text{обр.мах}}$ – максимально допустимое по ТУ постоянное обратное напряжение; $U_{\text{кэ.раб}}$ – рабочее напряжение коллектор-эмиттер; $U_{\text{кэ.мах}}$ – максимально допустимое по ТУ напряжение коллектор-эмиттер.

Таблица 6.24

Значения коэффициента K_M в зависимости от наличия согласующих схем для высокочастотных (СВЧ) транзисторов

Характер согласования в электрической схеме	Значение K_M
Согласован по входу и выходу	1
Согласован по входу	2
Не согласован, либо характер согласования не известен	4

Коэффициент нагрузки по напряжению S (см. табл. 6.23) определяется как

$$S = \frac{U_{\text{КЭ.раб}}}{U_{\text{КЭ.ном}}}, \quad (6.12)$$

где $U_{\text{КЭ.раб}}$ – напряжение коллектор-эмиттер в рабочем режиме;

$U_{\text{КЭ.ном}}$ – предельно допустимое (номинальное) напряжение коллектор-эмиттер.

Значения коэффициента уровня качества K_Q выбирают из табл. 6.25–6.27.

Таблица 6.25

Коэффициент влияния уровня качества K_Q (диоды низкочастотные; транзисторы: биполярные низкочастотные, полевые низкочастотные, однопереходные; тиристоры)

Уровень качества по MIL-S-19500	K_Q	Соответствие отечественным видам приёмки
JANTXV	0,7	«7», «9»
JANTX	1,0	«5»
JAN	2,4	«3»
Более низкий уровень качества	5,5	«1»
Пластмасса	8	«1», пластмассовые корпуса
Уровень качества неизвестен	10	

Таблица 6.26

Коэффициент влияния уровня качества K_Q (диоды СВЧ)

Уровень качества по MIL-S-19500	K_Q		Соответствие отечественным видам приёмки
	Диоды СВЧ, кроме диодов Шоттки	Диоды Шоттки	
JANTXV	0,5	0,5	«9»
JANTX	1	1	«5»
JAN	5	1,8	«3»
Более низкий уровень качества	25	2,5	«1»
Пластмасса	50	–	«1», пластмассовые корпуса

Таблица 6.27

Коэффициент влияния уровня качества K_Q
(транзисторы биполярные высокочастотные, полевые высокочастотные)

Уровень качества по MIL-S-19500	K_Q	Примерное соответствие отечественным видам приёмки
JANTXV	0,5	«9»
JANTX	1,0	«5»
JAN	2,0	«3»
Более низкий уровень качества	5,0	«1»
Пластмасса	8	«1», пластмассовые корпуса
Уровень качества неизвестен	10	–

Выбор значений коэффициента K_E , учитывающего жёсткость условий эксплуатации, рассматривается в подразд. 6.7.

6.4. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы

Расчёт эксплуатационной интенсивности отказов λ_{Σ} отдельных групп оптоэлектронных полупроводниковых приборов выполняется по математическим моделям, включённым в табл. 6.28.

Таблица 6.28

Модели расчёта λ_{Σ} оптоэлектронных полупроводниковых приборов

Группа изделий	Вид математической модели
Фотоприемники, оптопары, излучатели полупроводниковые, буквенно-цифровые дисплеи	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_I \cdot K_Q \cdot K_E$
Лазерные диоды	$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_I \cdot K_I \cdot K_{\Phi} \cdot K_P \cdot K_Q \cdot K_E$

Примечание. λ_B – базовая интенсивность отказов.

Значения базовой интенсивности отказов λ_B приведены в табл. 6.29.

Таблица 6.29

Справочные данные λ_B отдельных групп оптоэлектронных полупроводниковых приборов

Группа изделий	$\lambda_B \times 10^{-6}$ 1/ч
1. Фотоприемники транзисторные (фототранзисторы)	0,0055
2. Фотоприемники диодные (фотодиоды)	0,004
3. Оптопары диодные единичные	0,0025
4. Оптопары транзисторные единичные (включая пару Дарлингтона)	0,013
5. Оптопары резисторные единичные	0,0064
6. Оптопары диодные двоичные	0,0033
7. Оптопары транзисторные двоичные (включая пару Дарлингтона)	0,017
8. Оптопары резисторные двоичные	0,0086
9. Излучающие диоды инфракрасного диапазона	0,0013
10. Светоизлучающие диоды	0,00023
11. Сегментные дисплеи	по табл. 6.30 ¹
12. Дисплеи с диодной матрицей	по табл. 6.30 ¹
13. Лазерные диоды (тип полупроводникового излучающего материала):	
<i>GaAs / AlGaAs</i>	3,23
<i>InGaAs / InGaAsP</i>	5,65

Примечание. ¹ Модели расчёта базовой интенсивности отказов λ_B сегментных дисплеев и дисплеев с диодной матрицей приводятся в табл. 6.30.

Таблица 6.30

Базовая интенсивность отказов λ_B сегментных дисплеев и дисплеев с диодной матрицей

Группа оптоэлектронных приборов	Модель расчёта λ_B , 1/ч	Пояснение параметров
Сегментные дисплеи	$\lambda_B = (0,00043 \cdot N + \lambda_{LC}) \times 10^{-6}$	N – количество разрядов дисплея; $\lambda_{LC} = 0,000043$ – для дисплеев с логическим чипом; $\lambda_{LC} = 0$ – для дисплеев без логического чипа
Дисплеи с диодной матрицей	$\lambda_B = (0,00009 + 0,00017N + \lambda_{LC}) \times 10^{-6}$	

Коэффициенты K_t , K_Φ и K_S моделей табл. 6.28 определяются с помощью табл. 6.31–6.33.

Таблица 6.31

Расчёт коэффициента режима K_t ($K_{t,x}$) в зависимости от температуры перехода

Группа изделий	Формула расчёта K_t	V_a	Пояснение
Все группы оптоэлектронных полупроводниковых приборов, кроме лазерных диодов	$K_t = e^{-V_a \left(\frac{1}{T_{\Pi} + 273} - \frac{1}{298} \right)}$	2790	T_{Π} – температура перехода
Лазерные диоды		4635	
<p><i>Примечание.</i> Температура перехода T_{Π} вычисляется по выражению</p> $T_{\Pi} = T_{\text{окр}} + R_{\text{кр-окр}} \cdot P = T_{\text{корп}} + R_{\text{кр-корп}} \cdot P,$ <p>где $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды; °С; $T_{\text{корп}}$ – температура корпуса прибора, °С; $R_{\text{кр-окр}}$ – тепловое сопротивление «кристалл – окружающая среда»; °С/Вт; $R_{\text{кр-корп}}$ – тепловое сопротивление «кристалл – корпус»; °С/Вт; P – фактическая мощность рассеяния прибора, Вт. Значения тепловых сопротивлений берутся из спецификации на изделия.</p>			

Таблица 6.32

Расчет коэффициента K_Φ в зависимости от функционального назначения прибора для лазерных диодов

Функциональный режим работы	K_Φ
Непрерывный	4,4
Импульсный	$K_\Phi = 1/(\text{скважность})^{0,5}$

Таблица 6.33

Коэффициент влияния жёсткости электрического режима работы лазерных диодов K_S

Модель определения K_S	Условие применения модели	Пояснение параметров
$K_S = \frac{1}{2 \cdot \left(1 - \frac{P_{\text{вых.раб}}}{P_{\text{вых.мах}}} \right)}$	$0 < \frac{P_{\text{вых.раб}}}{P_{\text{вых.мах}}} \leq 0,95$	$P_{\text{вых.раб}}$ – выходная мощность оптического излучения в рабочем режиме; $P_{\text{вых.мах}}$ – максимальная выходная мощность оптического излучения

Коэффициент влияния прямого тока K_I определяют по модели

Таблица 6.34

$$K_I = I^{0,68}, \quad (6.13)$$

Коэффициент влияния уровня качества K_Q для лазерных диодов

Уровень качества	K_Q
Герметичный корпус	1
Негерметичный с покрытием	1
Негерметичный без покрытия	3,3
Степень герметичности корпуса не установлена, уровень качества неизвестен	5

где I – пиковое значение прямого тока, А ($I < 25$ А).

Значения коэффициента уровня качества K_Q выбирают в зависимости от группы оптоэлектронных приборов по табл. 6.34, 6.35.

Значения коэффициента влияния качества изготовления K_Q
для оптоэлектронных полупроводниковых приборов, кроме лазерных диодов

Уровень качества по MIL-S-19500	K_Q	Примерное соответствие отечественным видам приёмки
JANTXV	0,7	«7»
JANTX	1,0	«5»
JAN	2,4	«3»
Более низкий уровень качества	5,5	«1»
Пластмасса	8	«1», пластмассовые корпуса
Уровень качества неизвестен	10	–

Выбор значений коэффициента эксплуатации K_E рассматривается в подразд. 6.7.

6.5. Резисторы

Для всех групп и типов резисторов эксплуатационную интенсивность отказов λ_{Σ} рассчитывают по модели

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_i \cdot K_P \cdot K_S \cdot K_E \cdot K_Q, \quad (6.14)$$

где λ_B – базовая интенсивность отказов резисторов данной группы (табл. 6.36).

Таблица 6.36

Справочные данные для определения параметров модели (6.14)

Группа резисторов	$\lambda_B, \times 10^{-6}$ 1/ч
1. Резисторы постоянные композиционные изолированные (RC, RCR)	0,0017
2. Резисторы постоянные пленочные изолированные (RL, RLR)	0,0037
3. Резисторы постоянные пленочные высокостабильные (RN)	0,0037
4. Резисторы постоянные пленочные бескорпусные (Chip) (RM)	0,0037
5. Резисторы постоянные пленочные мощные (RD)	0,0037
6. Резисторные сборки постоянные пленочные (RZ)	0,0019
7. Резисторы постоянные проволочные прецизионные (RB, RBR)	0,0024
8. Резисторы постоянные проволочные мощные (RW, RWR)	0,0024
9. Резисторы постоянные проволочные мощные, монтируемые на шасси (RE, RER)	0,0024
10. Терморезисторы изолированные (RTH)	0,0019
11. Резисторы переменные проволочные подстроечные (RT, RTR)	0,0024
12. Резисторы переменные проволочные прецизионные (RR, RA)	0,0024
13. Резисторы переменные проволочные полупрецизионные (RK)	0,0024
14. Резисторы переменные проволочные мощные (RP)	0,0024
15. Резисторы переменные непроволочные (RJ, RJR)	0,0037
16. Резисторы переменные композиционные (RV)	0,0037
17. Резисторы переменные непроволочные прецизионные (RQ)	0,0037
18. Резисторы переменные непроволочные пленочные (RVC)	0,0037

Примечание. В скобках приводятся сокращения, используемые за рубежом для соответствующих групп резисторов.

Коэффициенты K_t , K_S и K_Q модели (6.14) определяются с помощью табл. 6.37–6.39.

Таблица 6.37

Расчет коэффициента K_t в зависимости от температуры корпуса резистора

Группа резисторов	Формула расчёта K_t	E_a
1. Постоянные пленочные, в т. ч. поверхностного монтажа	$K_t = e^{-\left[\frac{-E_a}{8,617 \cdot 10^5} \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{298} \right) \right]}$ <p>где T – температура корпуса резистора, °С</p>	0,08
2. Постоянные проволочные		0,08
3. Сборки резисторные, в т. ч. поверхностного монтажа		0,20
4. Переменные проволочные: <i>все, кроме полупрецизионных полупрецизионные</i>		0,08 0,20
5. Переменные непроволочные: <i>все, кроме прецизионных прецизионные</i>		0,08 0,20

Примечание. Для маломощных резисторов (максимальная мощность рассеяния $P_{\max} < 1$ Вт) температура корпуса T приравнивается к температуре окружающей среды.

Таблица 6.38

Расчет коэффициента K_S в зависимости от электрической нагрузки резистора

Группа резисторов	Формула расчёта K_S	Пояснение
1. Постоянные пленочные, в т. ч. поверхностного монтажа 2. Постоянные проволочные, кроме мощных 3. Переменные проволочные 4. Переменные непроволочные	$K_S = 0,71 \cdot e^{1,1 \cdot S}$	S – коэффициент электрической нагрузки: $S = \frac{P_{\text{раб}}}{P_{\text{max}}}$ <p>где $P_{\text{раб}}$ – рабочая (фактическая) мощность рассеяния резистора, Вт; P_{max} – максимальная мощность рассеяния резистора при данной температуре, Вт.</p>
5. Постоянные проволочные мощные 6. Сборки резисторные, в т. ч. поверхностного монтажа	$K_S = 0,54 \cdot e^{2,04 \cdot S}$	
7. Терморезисторы	$K_S = 1$	–

Примечание. Зависимость максимальной мощности рассеяния P_{\max} от температуры приводится в спецификациях на резисторы.

Таблица 6.39

Значения коэффициента влияния качества изготовления K_Q для резисторов

Уровень качества	Буквенное обозначение уровня качества	K_Q	Примерное соответствие отечественным видам приёмки
Изделия с приёмкой Military с опубликованным уровнем качества, изготовленные в соответствии с: MIL-PRF-39017, MIL-PRF-39005, MIL-PRF-39007, MIL-PRF-39009, MIL-PRF-23648, MIL-PRF-39015, MIL-PRF-39035, MIL-PRF-914, MIL-PRF-55182, MIL-PRF-55342	S	0,03	«9»
	P	0,1	«9»
	R	0,3	«7»
	M	1	«5»
Изделия с приёмкой Military с неопубликованным уровнем качества	–	3	«3»
Изделия с более низким уровнем качества	–	10	«1»

Коэффициент K_P , учитывающий влияние мощности рассеяния, определяют по формуле

$$K_P = (P_{\text{раб}})^{0,39}, \quad (6.15)$$

где $P_{\text{раб}}$ – мощность рассеяния резистора в рабочем режиме, Вт.

Выбор значений коэффициента эксплуатации K_E рассматривается в подразд. 6.7.

6.6. Конденсаторы

Для всех групп и типов конденсаторов эксплуатационную интенсивность отказов рассчитывают по модели

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_B \cdot K_t \cdot K_C \cdot K_S \cdot K_{SR} \cdot K_E \cdot K_Q, \quad (6.16)$$

где λ_B – базовая интенсивность отказов (табл. 6.40).

Таблица 6.40

Характеристика надёжности
и справочные данные отдельных групп конденсаторов

Группа изделий	ОТУ	Сокращения групп конденсаторов, используемые за рубежом	λ_B , $\times 10^{-6}$ 1/ч	E_a
1. Бумажные / с органическим синтетическим диэлектриком	MIL-PRF-19978 MIL-PRF-39022 MIL-PRF-55514 MIL-PRF-83421	CP, CA, CZ, CZR, CQ, CQR, CH, CHR, CRH	0,00051	0,35
2. Слюдяные	MIL-PRF-39001	CM, CMR, CB	0,00076	0,35
3. Стекланные	MIL-PRF-23269	CY, CYR	0,00076	0,35
4. Керамические постоянной ёмкости термокомпенсационные	MIL-PRF-20	CC, CCR	0,00099	0,35
5. Керамические постоянной ёмкости	MIL-PRF-123 MIL-PRF-39014	CK, CKR	0,00099	0,35
7. Керамические постоянной ёмкости поверхностного монтажа	MIL-PRF-55681	Chip CDR	0,002	0,35
8. Керамические переменной ёмкости (триммеры)	MIL-PRF-81	CV	0,0079	0,15
10. Оксидно-полупроводниковые	MIL-PRF-39003	CSR	0,0004	0,15
11. Оксидно-полупроводниковые поверхностного монтажа	MIL-PRF-55365	Chip CWR	0,00005	0,15
12. Объемно-пористые	MIL-PRF-39006	CL, CLR	0,0004	0,15
13. Оксидно-электролитические алюминиевые	MIL-PRF-39018	CU, CUR, CE	0,00012	0,35
14. Переменные поршневого типа трубчатые подстроечные	MIL-PRF-14409	PC	0,006	0,35

Коэффициент, учитывающий влияние повышенной температуры K_t , рассчитывается по модели

$$K_t = e^{-\left[\frac{-E_a}{8,617 \cdot 10^5} \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{298} \right) \right]}, \quad (6.17)$$

где E_a – энергия активации, эВ (см. табл. 6.40);

T – температура корпуса конденсатора, °С (принимается равной максимальной рабочей температуре электронного устройства).

Коэффициенты K_C и K_S модели (6.16) определяются с помощью табл. 6.41, 6.42.

Таблица 6.41

Расчет коэффициента K_C в зависимости от номинальной ёмкости конденсатора

Группа изделий	K_C	Пояснение
Все группы конденсаторов, кроме электролитических	$K_C = C^{0,09}$	C – номинальная ёмкость конденсатора, мкФ
Электролитические (оксидно-полупроводниковые, в т. ч. поверхностного монтажа, объемно-пористые, оксидно-электролитические алюминиевые)	$K_C = C^{0,23}$	

Таблица 6.42

Расчет коэффициента K_S в зависимости от электрической нагрузки по напряжению конденсатора

Группа изделий	K_S	Пояснения параметров
Бумажные / с органическим синтетическим диэлектриком, оксидно-электролитические алюминиевые	$K_S = (S/0,6)^5 + 1$	S – коэффициент электрической нагрузки: $S = \frac{U_{\text{раб}}}{U_{\text{ном}}},$ где $U_{\text{раб}}$ – напряжение на конденсаторе в рабочем режиме; $U_{\text{ном}}$ – предельно допустимое (номинальное) напряжение, указанное в документации на конденсатор
Слюдяные, стеклянные	$K_S = (S/0,6)^{10} + 1$	
Керамические постоянной ёмкости	$K_S = (S/0,6)^3 + 1$	
Оксидно-полупроводниковые, объемно пористые	$K_S = (S/0,6)^{17} + 1$	
Керамические переменной ёмкости, переменные поршневого типа трубчатые подстроечные	$K_S = (S/0,5)^3 + 1$	

Примечание. $U_{\text{раб}}$ есть сумма приложенного постоянного напряжения и максимального (пикового) переменного напряжения.

Значения коэффициента влияния последовательного сопротивления K_{SR} выбирают, используя данные табл. 6.43. В этой таблице $R/U_{\text{раб}}$ – отношение активного последовательного сопротивления R между конденсатором и источником питания к рабочему напряжению на конденсаторе $U_{\text{раб}}$.

Значения коэффициента уровня качества K_Q выбирают по табл. 6.44.

Таблица 6.43

Коэффициент влияния последовательного сопротивления K_{SR}

$R/U_{\text{раб}}, \text{ Ом / В}$	K_{SR}
$> 0,8$	0,66
$> 0,6$ до 0,8	1
$> 0,4$ до 0,6	1,3
$> 0,2$ до 0,4	2
$> 0,1$ до 0,2	2,7
0 до 0,1	3,3

Значения коэффициента качества изготовления K_Q для конденсаторов

Уровень качества			Примерное соответствие отечественным видам приёмки
Характеристика приёмки изделий	Обозначение уровня качества	K_Q	
Изделия с приёмкой Military с опубликованным уровнем качества, изготовленные в соответствии с MIL-PRF-39003, MIL-PRF-55365	D	0,001	–
	C	0,01	–
	B	0,03	–
Изделия с приёмкой Military с опубликованным уровнем качества, изготовленные в соответствии с MIL-PRF-19978, MIL-PRF-39022, MIL-PRF-55514, MIL-PRF-83421, MIL-PRF-39001, MIL-PRF-23269, MIL-PRF-20, MIL-PRF-39014,	S	0,03	«9»
	R	0,1	«9»
	P	0,3	«7»
MIL-PRF-55681, MIL-PRF-39006, MIL-PRF-39018	M	1	«5»
–	L	2	«3»
Изделия с приёмкой Military с неопубликованным уровнем качества		3	«3»
Изделия с более низким уровнем качества		10	«1»

Значения коэффициента эксплуатации K_E выбирают в соответствии с подразд. 6.7.

6.7. Выбор значений коэффициента K_E

В табл. 6.45 приводятся приближённые (усреднённые) значения коэффициента K_E , для групп аппаратуры, указанных в табл. 6.45. Усреднение значений K_E сделано по данным военного справочника США [13] и стандарта Китая [15].

Таблица 6.45

Коэффициент влияния жёсткости условий эксплуатации K_E

Класс (группа элементов)	Группа аппаратуры в зависимости от условий эксплуатации по табл. 5.21						
	Зр	Зчр	Зов	Зпн	Зм	Змд	Бск
1. ИМС	1	1,5	2	4	6	8	8
2. ППП, включая оптоэлектронные:							
диоды низкочастотные (выпрямительные, импульсные, стабилитроны), кроме диодов высокочастотных и СВЧ	1	1,2	2	6	7,5	9	13
диоды высокочастотные и СВЧ	1	1,1	1,5	2	4	5	4
транзисторы биполярные низкочастотные, транзисторы полевые низкочастотные, транзисторы однопереходные	1	1,2	2,5	6	7,5	9	13
транзисторы биполярные высокочастотные и СВЧ, транзисторы полевые арсенидогаллиевые СВЧ	1	1,3	1,7	2	4	5	4
тиристоры	1	1,1	2	6	7,5	9	13
фототранзисторы, фотодиоды, оптопары, излучатели полупроводниковые (светодиоды)	1	1,1	1,8	2	5	8	5

Класс (группа элементов)	Группа аппаратуры в зависимости от условий эксплуатации						
	З _Р	З _{ЧР}	З _{ОВ}	З _{ПН}	З _М	З _{МД}	БСК
3. Знакосинтезирующие полупроводниковые индикаторы:							
алфавитно-цифровые дисплеи	1	1,1	2	3	4	8	4
лазерные диоды	1	1,1	2	3	4	8	4
4. Резисторы:							
постоянные	1	1,1	2	4	8	16	18
переменные	1	1,5	2,5	5	10	16	18
5. Конденсаторы	1	1,2	5	10	15	20	12

7. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЁТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ РЭУ В КУРСОВЫХ И ДИПЛОМНЫХ ПРОЕКТАХ

7.1. Требования к показателям безотказности и ремонтпригодности

В задании на курсовое или дипломное проектирование должны быть чётко указаны требования к показателям надёжности проектируемого или модернизируемого РЭУ. В большинстве случаев заказчик (руководитель проекта) формулирует общие требования к надёжности, например, в виде записи: «*требования к показателям надёжности по ГОСТ 27.003–90*». Задача студента выбрать номенклатуру задаваемых показателей, установить их численные значения и в принятом в вузе порядке согласовать их с руководителем проекта.

Показатели, как правило, должны выбираться из числа тех, определения которых приведены в ГОСТ 27.002–89. Допускается применять показатели, наименование и определение которых конкретизируют соответственные термины, установленные ГОСТ 27002–89, с учётом особенностей изделия и (или) специфики его применения, но не противоречат стандартизованным терминам. Пример такого показателя: *вероятность выполнения задачи электронной аппаратурой (в составе технологической установки) за смену*. Общее количество задаваемых показателей должно быть минимальным, но характеризовать все этапы эксплуатации РЭУ: использование по назначению, хранение, транспортирование, техническое обслуживание, ремонт и т. д.

Поясним порядок задания требований к показателям надёжности на примере показателей безотказности и ремонтпригодности.

Выбор номенклатуры показателей надёжности осуществляют на основе классификации изделий по признакам, характеризующим их назначение, последствия отказов и достижения предельного состояния, особенности режимов применения и др. Определение классификационных признаков изделия осуществляют путём инженерного анализа и согласования его результатов с руководителем. Основным источником информации для такого анализа является ТЗ на разработку или модернизацию изделия в части характеристик его назначения и

условий эксплуатации и данные о надёжности изделий-аналогов. Основные классификационные признаки и подразделение изделий на виды при задании требований по надёжности представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Классификация изделий при задании требований по надёжности

Классификационный признак	Вид изделий
1. Определённость назначения	Изделия конкретного назначения (ИКН), примеры: мобильный телефон, цифровой фотоаппарат, музыкальный центр, переносная радиостанция и т. д. Изделия общего назначения (ИОН), пример: универсальная ЭВМ, микропроцессорный блок управления и т. д.
2. Режим применения	Непрерывного длительного применения (НПДП) Многократного циклического применения (МКЦП) Однократного применения (с предшествующим периодом ожидания применения и хранения) – ОКРП
3. Число возможных состояний по работоспособности	Изделия вида I: в процессе эксплуатации могут находиться в двух состояниях – работоспособном или неработоспособном Изделия вида II: кроме работоспособного или неработоспособного состояния могут находиться в частично неработоспособных состояниях, в которые они переходят в результате частичного отказа
4. Возможность восстановления работоспособного состояния после отказа	Восстанавливаемые Невосстанавливаемые
5. Необходимость технического обслуживания в процессе эксплуатации	Обслуживаемые Необслуживаемые

Схема выбора номенклатуры показателей безотказности и ремонтпригодности с учётом признаков классификации приведена в табл. 7.2.

Табл. 7.2 составлена с учётом ГОСТ 27003–90, который является обязательным для изделий, разрабатываемых по заказам Министерств обороны и рекомендуемым – для других изделий. Поэтому по согласованию с руководителем проекта при выборе показателей безотказности и ремонтпригодности возможны отступления от указаний табл. 7.2.

Рассматриваемые в рамках курсового и дипломного проектирования электронные устройства относятся обычно к ИКН с режимом применения МКЦП или НПДП. Для таких устройств лучше всего выбирать в качестве показателей безотказности и ремонтпригодности T_0 и T_B (восстанавливаемые изделия) или T_{cp} (невосстанавливаемые изделия). Показатель безотказности $P(t_3)$ для указанных электронных устройств целесообразно выбирать в том случае, если принципиальным является факт выполнения устройством какой-то задачи в течение непрерывной наработки (продолжительности выполнения типового технологического процесса, продолжительности решения типовой задачи, например контроля воздушного пространства при посадке самолёта и т. п.).

Рекомендации по выбору номенклатуры
показателей безотказности и ремонтпригодности для изделий вида I

Классификация изделий по признакам, определяющим выбор показателя надёжности				
По назначению	По режиму применения (функционирования)	По возможности восстановления и обслуживания		
		Восстанавливаемые		Невосстанавливаемые
		Обслуживаемые	Необслуживаемые	Обслуживаемые и необслуживаемые
ИКН	НПДП	$K_{Г}; T_0$	$K_{Г}; T_0$	$P(t_3)^{**}$ или $T_{ср}$
	МКЦП	$K_{О.Г}(t_3) = K_{Г} \cdot P(t_3); T_{В}$		$P_{0(вкл)}$ и $T_{ср}$
	ОКРП	$P(t_3); T_{В.ож}$	$P(t_3); T_{В.ож}$	$P(t_{ож}); P(t_3)$
ИОН	НПДП, МКЦП	$T_0; T_{В}^*$	$T_0; T_{В}^*$	T_{γ} или $T_{ср}$
	ОКРП	–	–	$P_{0(вкл)}$

Примечание. T_0 – средняя наработка на отказ (наработка на отказ); $K_{Г}$ – коэффициент готовности; $P(t_3)$ – вероятность безотказной работы за заданное время t_3 ; $K_{О.Г}(t_3)$ – коэффициент оперативной готовности за время t_3 ; $P_{0(вкл)}$ – вероятность безотказного включения; $T_{В.ож}$ – среднее время восстановления в режиме ожидания; $T_{ср}$ – среднее время безотказной работы; T_{γ} – гамма-процентная наработка до отказа; $P(t_{ож})$ – вероятность безотказной работы за время ожидания $t_{ож}$.

Пример записи требований по надёжности в задании на дипломное проектирование. *Надёжность* _____ *в условиях и режимах эксплуатации,*
(наименование РЭУ)
указанных в пп. _____ задания на проектирование, должна характеризоваться
следующими значениями показателей:

средняя наработка на отказ – не менее 5000 ч;

среднее время восстановления на объекте эксплуатации – не более 1,0 ч.

По указанию руководителя проекта может быть дано указание на расчёт других показателей безотказности, требования к которым не установлены в задании на проектирование (например гамма-процентной наработки до отказа).

7.2. Последовательность выполнения расчёта показателей безотказности

В курсовых и дипломных проектах специальностей «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС» и «Проектирование и производство РЭС» должен предусматриваться, как правило, уточнённый расчёт показателей безотказности, а при необходимости и показателей ремонтпригодности проектируемого или модернизируемого РЭУ.

В случае сложных РЭУ (два и более блока, модуля и т. п.) порядок прогнозирования их надёжности расчётным методом определяется ГОСТ 27.301–95. Выделяют составные части РЭУ – модули, обычно на уровне печатных узлов. Отдельную самостоятельную часть составляют несущая конструкция с органами коммутации и управления, межблочный монтаж и ЭРИ, не входящие в печатные узлы. Рассчитывают показатели безотказности функциональных

частей (модулей) и, используя эти показатели, оценивают безотказность РЭУ в целом.

Основными исходными данными для расчёта являются:

- электрические принципиальные схемы функциональных частей и устройства в целом, перечни элементов к схемам;
- спецификации к сборочным единицам и сборочные чертежи функциональных частей и РЭУ в целом;
- результаты расчёта теплового режима РЭУ с указанием значений перегрева в нагретой зоне Δt_3 и среднего перегрева внутри устройства Δt_B ;
- информация о категории исполнения по ГОСТ 15150–69 и объекте размещения РЭУ или указание о требованиях к климатическим факторам и механическим воздействиям по другим ГОСТам либо численное описание этих требований;
- карты электрических режимов работы элементов (желательно);
- информация об уровне качества элементов (виде приёмки элементов в условиях производства).

Рекомендуемая последовательность расчёта показателей безотказности. В рассматриваемом РЭУ выделяют функциональные части, которые с точки зрения надёжности будут рассматриваться как самостоятельные.

Для каждой (i -й) выделенной части (модуля) последовательно выполняют следующие действия.

1. Пользуясь перечнями элементов и (или) спецификациями, а при необходимости и технической документацией на элементы, выясняют значение их электрических и эксплуатационных характеристик, необходимых для выбора или расчёта поправочных коэффициентов, используемых в математических моделях расчёта (прогнозирования) эксплуатационной интенсивности отказов элементов. Для ИМС необходимо хотя бы ориентировочно уточнить количество элементов в составе ИС или количество бит (для ИМС памяти).

2. С помощью карт электрических режимов или методом экспресс-анализа электрических схем находят коэффициенты электрической нагрузки элементов. Допускается погрешность до 20 %. Если какая-то ИМС работает в облегчённом режиме, то рассчитывают коэффициент облегчения режима $K_{обл}$ (см. подразд. 3.2).

3. Определяют максимально возможную температуру элементов при работе в составе РЭУ: для теплонагруженных элементов – с учётом значения Δt_3 , для нетеплонагруженных – с учётом значения Δt_B .

4. Дают оценку эксплуатационной интенсивности отказов $\lambda_Э$ элементов производства стран СНГ. Для этого для каждого элемента последовательно выполняют следующее:

- пользуясь табл. 5.3, находят справочное значение интенсивности отказов группы элементов, в которую входит рассматриваемый элемент;
- по табл. 5.1 уточняют математическую модель расчёта эксплуатационной интенсивности отказов $\lambda_Э$;

- в зависимости от класса и группы, в которую входит рассматриваемый элемент, его характеристик и особенностей, а также условий эксплуатации РЭУ и вида приёмки элемента (при его изготовлении в условиях производства) определяют значения поправочных коэффициентов, входящих в выбранную модель расчёта эксплуатационной интенсивности отказов $\lambda_{\text{Э}}$;

- выполняют расчёт (прогнозирование) $\lambda_{\text{Э}}$.

5. Пользуясь информацией разд. 6, выполняют расчёт (прогнозирование) $\lambda_{\text{Э}}$ элементов иностранного производства.

6. Если печатная плата имеет металлизированные отверстия, то определяют её эксплуатационную интенсивность отказов, пользуясь моделью, приведённой в табл. 5.1 и учитывая количество паек металлизированных отверстий.

7. Определяют эксплуатационную интенсивность отказов соединений пайкой на печатной плате для отверстий, где нет металлизации.

8. С помощью обычного суммирования значений $\lambda_{\text{Э}}$ элементов и компонентов подсчитывают эксплуатационную интенсивность отказов i -й функциональной части (модуля) $\Lambda_{\text{Э}i}$; $i = 1, \dots, N$, где N – количество модулей.

При расчёте величины $\Lambda_{\text{Э}i}$ элементы одного функционального назначения с одинаковыми электрическими режимами, конструктивно-технологическими и другими факторами могут объединяться в группы однотипных элементов. В этом случае значение $\Lambda_{\text{Э}i}$ для i -го модуля определяют по выражению

$$\Lambda_{\text{Э}i} = \sum_{j=1}^k \lambda_{\text{Э}j} \cdot n_j, \quad (7.1)$$

где $\lambda_{\text{Э}j}$ – эксплуатационная интенсивность отказов элементов j -й группы;

n_j – количество элементов в j -й группе; в предельном случае в каждой группе может быть всего лишь по одному элементу;

k – число сформированных групп однотипных элементов.

Для соединений пайкой на печатной плате для отверстий, где нет металлизации, количество элементов в j -й группе всегда больше единицы ($n_j > 1$).

Эксплуатационную интенсивность отказов РЭУ в целом определяют суммированием значений $\Lambda_{\text{Э}i}$:

$$\Lambda_{\text{РЭУ}} = \Lambda_{\text{Э}1} + \Lambda_{\text{Э}2} + \dots + \Lambda_{\text{Э}N}. \quad (7.2)$$

Если в составе РЭУ имеются одинаковые модули, то для расчёта величины $\Lambda_{\text{РЭУ}}$ вместо (7.2) может использоваться выражение

$$\Lambda_{\text{РЭУ}} = \sum_{i=1}^v \Lambda_{\text{Э}i} \cdot m_i, \quad (7.3)$$

где m_i – количество модулей i -го вида в составе РЭУ;

v – число разновидностей модулей.

В предположении экспоненциального закона надёжности по формулам (4.5)–(4.8) находят расчётные значения других показателей безотказности РЭУ.

7.3. Пример расчёта показателей безотказности РЭУ

Рассмотрим *уточнённый расчёт* показателей безотказности функционального модуля, выполненного с использованием печатного монтажа. Печатная плата двухслойная с металлизированными сквозными отверстиями. Общее количество отверстий на печатной плате 853, из них металлизацию имеют 505 отверстий. Электрическое соединение модуля с РЭУ, в составе которого он будет функционировать, осуществляется посредством соединителя типа СНП34. Уровень качества элементов (компонентов), используемых в модуле, соответствует приёмке «1» – приёмке ОТК. Модуль предназначен для эксплуатации в составе подвижной аппаратуры категории исполнения УХЛ 2.1 по ГОСТ 15150–69 [5]. Заданное время работы, указанное заказчиком, составляет $t_p = 1000$ ч. Интересующие показатели безотказности – T_0 , $P(t_p)$ и T_γ при $\gamma = 95\%$.

Предполагаем, что в нашем распоряжении имеются карты электрических режимов работы элементов модуля и результаты теплового расчёта РЭУ, в составе которого будет функционировать модуль:

- перегрев в нагретой зоне $\Delta t_3 = 15$ °С;
- средний перегрев воздуха в РЭУ $\Delta t_B = 10$ °С.

Считаем, что схмотехническое решение модуля таково, что ИМС работают в типовых электрических режимах, а информация об элементах (компонентах), входящих в модуль, соответствует табл. 7.3.

Таблица 7.3

Элементы и компоненты, входящие в модуль

Элемент, компонент	Позиционное обозначение	Тип	Функциональное назначение	Количество	Примечание
ИМС	DA1	КР512ПС11	Преобразователь частоты	1	5652 элемента
ИМС	DD1	КР533АГ3	Формирователь импульсов	1	238 элементов
ИМС	DD2 – DD11	КР533ИК4	Комбинированная цифровая ИС	10	2200 элементов
ИМС	DD12 – DD17	КР533ИР28	Регистр	6	560 элементов
ИМС	DD18 – DD23	КР533ИЕ17	Счётчик	6	455 элементов
ИМС	DD24	КР541РУ5	ОЗУ	1	8192 бит
ИМС	DD25	КР541РТ2	ПЗУ	1	16384 бит
Диоды импульсные	VD1 – VD12	КД520А	Переключающий режим работы	12	$I_{пр.ср \max \Gamma Y} < 1$ А, $U_{обр} = 60$ В, $K_H^{(U)} < 0,6$
Тиристор	VS1	КУ709Г2	Симистор	1	$I_{пр.ср \max \Gamma Y} = 10$ А
Биполярные транзисторы	VT1 – VT12	КТ3130А	Переключающий режим работы	12	Мощность до 1 Вт, $K_H^{(U)} < 0,5$
Конденсаторы керамические	C1 – C30	К10–73	–	30	$C = 0,01$ мкФ, $U = 100$ В
Резисторы	R1 – R52	C2–34	Постоянные, металлодиэлектрические	52	$P_{ном} = 0,125$ Вт, $R < 1$ кОм; допуск $\pm 10\%$

Элемент, компонент	Позиционное обозначение	Тип	Функциональное назначение	Количество	Примечание
Резисторы	R53 – R54	C2–23	То же	2	$P_{\text{ном}} = 1 \text{ Вт}, R < 1 \text{ кОм},$ допуск $\pm 10 \%$
Соединитель (розетка)	XS1	СНП34	–	1	135 конт., $t_{\text{п}} = 30 \text{ }^\circ\text{C},$ $n \approx 200$ за время t_p
Кварцевый резонатор	Q1	РК371	–	1	$f = 1048,576 \text{ кГц}$
МО, пропаянные волной	–	–	–	489	Количество отверстий N_1
МО, пропаянные ручным способом	–	–	–	16	Сторона установки элементов, количество отверстий N_2
Соединения пайкой волной	–	–	–	348	Дополнительно к МО, пропаянных волной

Примечания: 1. Корпуса используемых ИМС и ППП – пластмассовые, технология изготовления ИМС – не КМОП.

2. В таблице использованы интуитивно понятные обозначения параметров, характеризующих эксплуатационные возможности и электрический режим работы элементов.

3. Принятое сокращение: МО – металлизированные отверстия в печатной плате.

Этапы расчёта

Этап 1. Находим коэффициенты электрической нагрузки элементов, пользуясь картами электрических режимов и эксплуатационными электрическими характеристиками элементов, используемых в модуле. Считаем, что полученные данные соответствуют значениям, указанным в табл. 7.4.

Этап 2. Определяем максимальную температуру элементов модуля при его работе в составе РЭУ. Для учёта влияния температуры на эксплуатационную интенсивность отказов элементов $\lambda_{\text{Э}}$ принято во внимание верхнее значение предельной рабочей температуры ($t_{\text{раб max}} = +45 \text{ }^\circ\text{C}$), соответствующее РЭУ исполнения УХЛ 2.1 по ГОСТ 15150–69, и возможное увеличение предельной рабочей температуры на значение $\Delta t_{\text{C}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ за счёт нагрева (солнечными лучами) РЭУ и, следовательно, модуля в составе РЭУ (см. п. 5.4 ГОСТ 15150–69).

Предельная рабочая температура $t_{\text{эл max}}$ теплонагруженных элементов (ИМС, транзисторы, диоды, мощные резисторы) определена как

$$t_{\text{эл max}} = (t_{\text{раб max}} + \Delta t_{\text{C}}) + \Delta t_{\text{з}} = (45 + 10) + 15 = 70 \text{ }^\circ\text{C},$$

где $\Delta t_{\text{з}}$ – перегрев в нагретой зоне конструкции РЭУ.

Нагретая зона – это гипотетический объём, в котором условно рассеивается вся тепловая энергия, выделяемая элементами РЭУ.

Значение величины $t_{\text{эл max}}$ для нетеплонагруженных элементов (конденсаторы, слабонагруженные резисторы, соединитель, кварцевый резонатор) подсчитано как

$$t_{\text{эл max}} = (t_{\text{раб max}} + \Delta t_{\text{C}}) + \Delta t_{\text{в}} = (45 + 10) + 10 = 65 \text{ }^\circ\text{C},$$

где $t_{\text{в}}$ – средний перегрев воздуха внутри конструкции РЭУ.

Таблица 7.4

Расчёт эксплуатационной безотказности элементов модуля

Позиционное обозначение	Количество n_j	K_H	$\lambda_B \cdot 10^{-6}$ 1/ч	Вид математической модели расчёта $\lambda_{\text{Э}}$	Значение поправочного коэффициента																$\prod_i K_i$	$\lambda_{\text{Э}j} n_j \cdot 10^{-6}$ 1/ч
					$K_{\text{ИС}}$	K_P	K_t	$K_{\text{корп}}$	K_V	K_{Φ}	K_{Δ}	K_U	K_C	K_R	K_M	K_{Δ}	K_K	K_n	$K_{\text{Э}}$	$K_{\text{П}}$		
DA1	1	—	0,028	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	4,25		2,82	3	1										2	5,5	395,5050	11,0741
DD1	1	—	0,023	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	1,62		2,57	3	1										2	5,5	137,3922	3,1600
DD2–DD11	10	—	0,023	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	3,08		2,57	3	1										2	5,5	261,2148	60,0794
DD12–DD17	6	—	0,023	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	2,08		2,57	3	1										2	5,5	176,4048	24,3439
DD18–DD23	6	—	0,023	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	1,96		2,57	3	1										2	5,5	166,2276	22,9394
DD24	1	—	0,030	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	2,13		2,57	3	1										2	5,5	180,6453	5,4194
DD25	1	—	0,018	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_t K_{\text{ИС}} K_{\text{корп}} K_V K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$	3,33		2,57	3	1										2	5,5	282,4173	5,0835
VD1–VD12	12	0,4	0,025	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_P K_{\Phi} K_{\Delta} K_U K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$		0,26				0,6	0,6	0,7							3	8	1,5725	0,4717
VS1	1	0,3	0,2	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_P K_{\Delta} K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$		0,24					6								1,7	8	19,5840	3,9168
VT1–VT12	12	0,2	0,044	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_P K_{\Phi} K_{\Delta} K_U K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$		0,25				0,7	0,5	0,5							4	8	1,4000	0,7392
C1–C30	30	0,1	0,022	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_P K_C K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$		0,12							1,21						3	5	2,1780	1,4375
R1–R52	52	0,1	0,044	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_P K_R K_M K_{\Delta} K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$		0,48								1	0,7	1			3	3	3,0240	6,9189
R53–R54	2	0,6	0,044	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_P K_R K_M K_{\Delta} K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$		1,03								1	1,5	1			3	3	13,9050	1,2236
XS1	1	0,2	0,0041	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_P K_K K_n K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$		3,90											43,08	0,56	2	2,5	470,4336	1,9288
Q1	1	—	0,026	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_t K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$			1,97												1,7	9	30,1410	0,7837
Печатная плата с МО	$N_1=489$ $N_2=16$	—	$17 \cdot 10^{-6}$	См. табл. 5.1			3,44												3	5	51,6000	0,6254
Соединения пайкой волновой	348	—	$69 \cdot 10^{-6}$	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_B K_t K_{\text{Э}} K_{\text{П}}$			3,44												3	5	51,6000	1,2390

Примечание. В последнем столбце значение $\lambda_{\text{Э}j} n_j = (\lambda_{\text{б}j} \prod_i K_i) n_j$, где i указывает учитываемый фактор, j – группу однотипных элементов.

Этап 3. Пользуясь табл. 5.3, находим справочные значения интенсивностей отказов элементов модуля. Полученные данные внесены в табл. 7.4.

Этап 4. По табл. 5.1 выбираем математические модели расчёта эксплуатационной интенсивности отказов элементов $\lambda_{\text{Э}}$. Выбранные модели записаны в табл. 7.4.

Этап 5. Определяем значения поправочных коэффициентов, входящих в выбранные модели расчёта эксплуатационной интенсивности отказов элементов $\lambda_{\text{Э}}$. Номера формул или таблиц, используемых для определения поправочных коэффициентов, находим по табл. 5.1 в зависимости от класса (группы) элементов модуля. Например, для расчёта коэффициентов $K_{\text{ИС}}$ интегральных микросхем использована модель (5.3) и табл. 5.4.

Найденные значения поправочных коэффициентов записаны в табл. 7.4.

Этап 6. Для каждого элемента находим произведение поправочных коэффициентов и значение эксплуатационной интенсивности отказов $\lambda_{\text{Э}}$. Для удобства расчёта элементы одного функционального назначения с примерно одинаковыми электрическими режимами, конструктивно-технологическими и другими факторами объединены в одну группу. Значение суммарной эксплуатационной интенсивности отказов элементов группы ($\lambda_{\text{Э}\Sigma}$) получено как

$$\lambda_{\text{Э}\Sigma} = \lambda_{\text{Э}j} \cdot n_j = \left(\lambda_{\text{Б}j} \prod_i K_i \right) n_j,$$

где $\lambda_{\text{Э}j}$ – эксплуатационная интенсивность отказов элементов j -й группы;

n_j – количество элементов в j -й группе (см. табл. 7.3).

Если в группе один элемент ($n_j = 1$), то для неё $\lambda_{\text{Э}\Sigma} = \lambda_{\text{Э}j}$.

Результаты расчётов этапа внесены в два последних столбца табл. 7.4.

Этап 7. Определяем эксплуатационную интенсивность отказов печатной платы с учетом совместно с металлизированными отверстиями, используя модель, приведённую в табл. 5.1. Значения коэффициента K_t определяем по выражению (5.30) при значении $t_{\text{окр}} = 65^\circ\text{C}$ (см. этап 2). Учитывая, что для одно- и двусторонних печатных плат коэффициент $K_{\text{сл}} = 1$, получаем

$$\lambda_{\text{Э}} = 0,000017 \cdot 10^{-6} \cdot [489 \cdot 1 + 16(13+1)] \cdot 3,44 \cdot 3 \cdot 5 \approx 0,6254 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Использованная для расчёта модель распространяется только на соединения (пайки) в металлизированных отверстиях. Пайки на печатной плате в неметаллизированных отверстиях должны учитываться отдельно.

Печатная плата как компонент конструкции модуля образует отдельную группу, для неё $\lambda_{\text{Э}\Sigma} = \lambda_{\text{Э}}$. Значение записываем в последний столбец табл. 7.4.

Этап 8. Определяем общую эксплуатационную интенсивность отказов соединений пайкой волной для отверстий, где нет металлизации, и результат заносим в последний столбец табл. 7.4:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{Э}\Sigma} &= 348 \cdot \lambda_{\text{Б}} K_t K_{\text{Э}} K_{\text{П}} = \left| \lambda_{\text{Б}} = 0,000069 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч (см. табл. 5.3)} \right| = \\ &= 348 \cdot 3,44 \cdot 0,000069 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 5 \approx 1,2390 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.} \end{aligned}$$

Этап 9. Подсчитываем эксплуатационную интенсивность отказов модуля (Λ_M). Для этого просуммируем значения, приведённые в последнем столбце табл. 7.4:

$$\Lambda_M = 151,3843 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Этап 10. В предположении экспоненциального закона надёжности найдём расчётные значения других показателей безотказности:

а) наработка на отказ:

$$T_0 = 1/\Lambda_M \approx 6605,7 \text{ ч;}$$

б) вероятность безотказной работы за время $t_p = 1000$ ч:

$$P_M(t_p) = e^{-t_p/T_0} \approx 0,86;$$

в) гамма-процентная наработка до отказа при $\gamma = 95$ %:

$$T_\gamma = -T_0 \ln(\gamma / 100) = -6605,7 \cdot \ln 0,95 \approx 338,8 \text{ ч.}$$

Примечание. Для печатной платы использована модель, учитывающая пайки сквозных металлизированных отверстий. Расчёт эксплуатационной интенсивности отказов самой печатной платы с учётом её площади и преобладающей ширины печатных проводников должен проводиться по отдельным моделям, которые в данном пособии не рассматриваются.

7.4. Использование учебной системы автоматизированного расчёта надёжности для определения показателей безотказности РЭУ

Учебная система автоматизированного расчёта и оптимизации надёжности электронных устройств (УС АРИОН) представляет собой модульный программный комплекс, позволяющий оценить (спрогнозировать) показатели безотказности электронных устройств на уровне блоков, модулей, основываясь на данных о надёжности элементов, электрических режимах и условиях их работы. Режим общения пользователя с ПЭВМ – интерактивный. УС АРИОН включает базу данных об обобщённых показателях безотказности различных классов и групп элементов производства стран СНГ, а также информацию, необходимую для определения значений поправочных коэффициентов. УС АРИОН содержит модуль работы с элементами иностранного производства (интегральные микросхемы, полупроводниковые приборы, оптоэлектронные полупроводниковые приборы, резисторы и конденсаторы).

Номенклатура показателей надёжности, подлежащих определению с помощью системы, – показатели безотказности электронных устройств в режиме работы согласно ГОСТ 27.002–89 [2].

Особенностью программного комплекса является графическое отображение вклада классов, групп и даже отдельных элементов (компонентов) в ненадёжность устройства в целом. Это позволяет с помощью программного комплекса целенаправленно и эффективно решать задачи по обеспечению показателей безотказности устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровиков, С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учеб. для студ. инж.-тех. спец. вузов / С. М. Боровиков. – Минск : Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
2. ГОСТ 27.002–89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М. : Изд-во стандартов, 1990.
3. European Organization of the Quality Control Glassary. – Bern : EOQC. 1988. – 24 p.
4. Надёжность технических систем : справочник / Ю. К. Беляев [и др.] ; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.
5. ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М. : Изд-во стандартов, 1980.
6. ГОСТ 27.003–90. Состав и общие правила задания требований по надёжности. – М. : Изд. стандартов, 1991. – 27 с.
7. ГОСТ 27.301–83. Прогнозирование надёжности изделий при проектировании. – М. : Изд-во стандартов, 1983.
8. ГОСТ 27.301-95. Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 27 с.
9. ГОСТ РВ 20.39.304-98. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. – М. : Госстандарт России, 1999. – 59 с.
10. Надёжность изделий электронной техники для устройств народнохозяйственного назначения : справочник / Разработан в соответствии с руководящим документом РД 50-670–88. – М. : ВНИИ «Электронстандарт», 1990. – 188 с.
11. Надёжность электрорадиоизделий, 2002 : справочник / С. Ф. Прытков [и др.]. – М. : ФГУП «22 ЦНИИИ МО РФ», 2004. – 574 с.
12. Надёжность электрорадиоизделий, 2006 : справочник / С. Ф. Прытков [и др.]. – М. : ФГУП «22 ЦНИИИ МО РФ», 2008. – 641 с.
13. Reliability prediction of electronic equipment : Military Handbook MIL–HDBK–217F. – Washington : Department of defense DC 20301, 1995. – 205 p.
14. A universal model for reliability prediction of Electronics components, PCBs and equipment. RDF 2000 : reliability data handbook / Paris : UTE C 80-810. 2000. – 99 p.
- 15 Reliability Prediction Model for Electronic Equipment : The Chinese Military/Commercial Standard GJB/z 299B. – Yuntong Forever Sci.-тек. Co. Ltd. China 299B.
16. Ануфриев, Д. М. Конструкционные методы повышения надёжности интегральных схем / Д. М. Ануфриев, М. И. Горлов, А. П. Достанко. – Минск : Интеграл-полиграф, 2007. – 264 с.
17. Белорусов, Н. И. Электрические кабели, провода и шнуры : справочник / Н. И. Белорусов, А. Е. Саакян, А. И. Яковлева ; под общ. ред. Н. И. Белорусова. – М. : Энергия, 1979. – 416 с.

Учебное издание

Боровиков Сергей Максимович
Цырельчук Игорь Николаевич
Троян Фёдор Данилович

РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Учебно-методическое пособие

Под редакцией С. М. Боровикова

Редактор *Н. В. Гриневич*
Корректор *Е. Н. Батурчик*

Подписано в печать 16.04.2010. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,19 Уч.-изд. л. 3,9. Тираж 150 экз. Заказ 226.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ № 02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП № 02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6