

Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет
Кафедра радиотехники и телекоммуникаций

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

по дисциплине

«Конструирование радиоэлектронной аппаратуры»

для студентов дневной и заочной форм обучения
направления 6.050901 — «Радиотехника»

Севастополь
2012

УДК 621.396.6

Учебное пособие по дисциплине «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры» для студентов дневной и заочной форм обучения направления 6.050901 — «Радиотехника» [Электронный ресурс] / СевНТУ; сост. В.Г. Слёзкин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. — 84 с.— Доступ: Сервер методических указаний кафедры РТ

Цель методической разработки: обеспечить студентам всех форм обучения направления «Радиотехника» возможность самостоятельного изучения теоретической части дисциплины КРЭА.

Утверждено на заседании кафедры радиотехники и телекоммуникаций, протокол № 12 от 02 июля 2011 г.

Рецензент: д-р техн. наук., профессор

Афонин И.Л.

Ответственный за выпуск:

д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой радиотехники
и телекоммуникаций

Гимпилевич Ю.Б.

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. Общие вопросы конструирования	5
1. Основные понятия, термины и определения	5
2. Системный подход к РЭС и их проектированию	6
2.1. Радиоэлектронное средство как система	6
2.2. Жизненный цикл изделия как система.....	8
2.3. Классификация РЭА по объектам-носителям	9
3. Система показателей качества РЭС	11
3.1. Виды показателей качества	11
3.2. Обобщенные показатели.....	11
3.3. Технические показатели (требования к конструкции).....	13
3.3.1. Устойчивость к климатическим воздействиям.....	13
3.3.2. Прочность и устойчивость к механическим воздействиям	13
3.3.3. Экологические требования	14
3.3.4. Требования системы «человек-машина»	15
3.3.5. Требования стандартизации и унификации	15
3.3.6. Патентно-правовые требования.....	16
Часть 2. Обеспечение работоспособности РЭА	17
4. Тепловой режим РЭС и его обеспечение.....	17
4.1. Основные определения	17
4.2. Связь теплового режима с электрическим.....	17
4.3. Анализ теплового режима.....	18
4.3.1. Общее уравнение теплопередачи и его электротехническая аналогия... 18	
4.3.2. Теплопередача теплопроводностью	21
4.3.3. Теплопередача конвекцией	22
4.3.4. Теплопередача излучением.....	24
4.4. Обеспечение теплового режима	25
4.4.1. Классификация систем обеспечения теплового режима.....	25
4.4.2. Выбор и расчет систем обеспечения теплового режима.....	25
4.4.3. Некоторые элементы систем обеспечения теплового режима	28
5. Механические воздействия и защита от них	30
5.1. Основные понятия.....	30
5.2. Описание колебаний тела с одной степенью свободы при вязком трении и кинематическом воздействии	30
5.3. Обеспечение прочности и устойчивости РЭС при воздействии вибрации.....	33
5.4. Особенности защиты от ударов.....	37
5.5. Защита от механических воздействий других видов	38
6. Паразитные связи и наводки в РЭС	39
6.1. Основные понятия.....	39
6.2. Источники и приемники наводок. Виды паразитных связей.....	39
6.3. Анализ паразитных связей.....	41
6.3.1. Кондуктивная паразитная связь.....	41
6.3.2. Емкостная (электростатическая) паразитная связь	42
6.3.3. Взаимоиндуктивная паразитная связь.....	43
6.3.4. Электромагнитная паразитная связь	45

	4
6.4. Борьба с паразитными связями и наводками.....	45
6.4.1. Классификация мер борьбы.....	45
6.4.2. Борьба с кондуктивной паразитной связью	45
6.4.3. Борьба с емкостной паразитной связью	47
6.4.4. Борьба со взаимоиндуктивной паразитной связью	50
6.4.5. Борьба с электромагнитной паразитной связью	52
6.4.6. Схемотехнические меры борьбы с наводками различных типов	53
6.4.7. Общие рекомендации.....	55
Часть 3. Надежность по внезапным отказам и ее обеспечение	56
7. Статистические показатели надежности	56
8. Интенсивность отказов элементов и среднее время безотказной работы	58
8.1. Зависимость интенсивности отказов элементов от времени наработки	58
8.2. Зависимость интенсивности отказов элементов от электрического режима, теплового режима и других факторов условий эксплуатации	59
8.3. Среднее время безотказной работы.....	60
9. Показатели надежности сложного изделия	61
9.1. Показатели надежности однофункционального изделия без резервирования	61
9.2. Оценка надежности многофункционального изделия без резервирования	62
9.3. Оценка надежности изделия с общим и поэлементным резервированием.....	63
10. Ресурсные показатели надежности	65
11. Принципы и приемы обеспечения надежности.....	67
11.1. Основные принципы проектирования надежной аппаратуры.....	67
11.2. Экономические ограничения при обеспечении надежности	67
11.3. Меры повышения надежности при разработке изделия	68
11.4. Избыточность при производстве	69
11.5. Меры повышения надежности при эксплуатации.....	71
Часть 4. Точность выходного параметра и параметрическая надежность изделия	72
12. Постановка задач.....	72
13. Анализ и обеспечение технологической точности изделия.....	73
13.1. Задачи, связанные с обеспечением точности.....	73
13.2. Статистические характеристики ЭРИ	73
13.3. Связь отклонений входных и выходных параметров.....	74
13.4. Синтез допусков на параметры элементов и выбор номиналов	75
13.5. Обеспечение точности выходного параметра методом «закрывающего звена»	77
14. Параметрическая надежность.....	78
14.1. Задачи, связанные с параметрической надежностью	78
14.2. Установление регламента технического обслуживания на основе линейных моделей ухода параметров	78
15. Обеспечение точности и параметрической надежности РЭА	80
15.1. Общие принципы	80
15.2. Приемы обеспечения параметрической надежности	80
15.3. Ограничения при проектировании	83
Библиографический список.....	84

ЧАСТЬ 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Согласно ГОСТ 26632-85 под **радиоэлектронным средством** (РЭС) понимают изделие или его составные части, решающие технические задачи передачи, приема и преобразования информации, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники.

Термин **радиоэлектронная аппаратура** (РЭА) был предложен в 1963 году и применяется как собирательное понятие для РЭС различного уровня и вида. Например, говорят о РЭА космического корабля, хотя конкретное представление о составе РЭС данный термин не даёт.

Конструкцией РЭС называется статическая пространственная структура и каналы связи с окружающей средой, предназначенная для размещения РЭС и обеспечения его функционирования в заданных условиях эксплуатации.

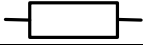
Здесь под понятием «окружающая среда» понимаются все другие РЭС, с которыми данное РЭС взаимодействует, человек-оператор и объект-носитель РЭС, а под «каналами связи» — все пути взаимодействия между РЭС и средой. Например, оператор может изменять частоту настройки, поворачивая ручку регулятора: здесь имеются механический канал связи и электрический канал связи.

Конкретный вид конструкции данного РЭС определяется следующими факторами:

- назначением РЭС;
- условиями его эксплуатации, включая характеристики окружающей среды и условия, создаваемые объектом-носителем РЭС;
- техническим уровнем элементной базы;
- физическими особенностями работы отдельных элементов РЭС;
- уровнем развития технологии изготовления РЭС;
- социальными факторами (например, эстетическими вкусами потребителя).

В элементах РЭС происходят преобразования энергии в различные ее виды и формы, что накладывает определенные ограничения на конструкцию РЭС (таблица 1.1).

Таблица 1.1 — Особенности некоторых электрорадиоизделий, влияющие на конструкцию РЭС

Элемент	Физический механизм	Особенности для конструирования
R 	Превращение электрической энергии в тепловую	Необходимо отводить излишнее тепло
L 	Электромагнитная индукция	Магнитное поле существует вне проводов, что накладывает ограничения на минимальные габариты
Диоды, транзисторы, микросхемы	Превращение электрической энергии в тепловую	Необходимо отводить излишнее тепло

В конструкции должны также быть учтены особенности работы элементов на высоких частотах, например, паразитные емкости монтажа, паразитные емкости элементов, индуктивности выводов элементов и т.п.

2. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РЭС И ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЮ

В силу сложности задач создания новых РЭС и внедрения их в производство наиболее плодотворным считается так называемый *системный подход*, согласно которому само РЭС и его жизненный цикл рассматриваются как технические системы.

Под *технической системой* понимают сложную совокупность элементов, предназначенную для решения конкретных технических задач.

Система обладает тремя основными свойствами:

- а) возможность композиции и декомпозиции;
- б) образование при композиции новых качеств, не сводящихся к сумме качеств элементов;
- в) иерархическая структура.

2.1. Радиоэлектронное средство как система

При разработке конкретного РЭС оно считается технической системой, входящей в состав *макросистемы*, о которой известны только параметры каналов связи с системой. Например, производителю аварийного радиобуя (АРБ) системы КОСПАС–САРСАТ должны быть известны только те требования, которые эта система предъявляет к техническим характеристикам АРБ.

В свою очередь, РЭС может быть рассмотрена как совокупность *подсистем*, выделенных по физическим принципам, например:

- электромагнитная подсистема (режимы электрических цепей и все виды электромагнитных взаимодействий внутри РЭС и при совместной работе данного РЭС с другими средствами и системами);
- механическая подсистема (пространственная структура конструкции, устойчивость конструкции в механических воздействиях);
- тепловая подсистема (все вопросы, связанные с распределением температур внутри РЭС);
- оптическая подсистема (оптическая индикация и передача сигналов);
- акустическая подсистема.

В РЭС также можно выделить составные части (разукрупнить) по функциональным признакам (рис. 2.1).

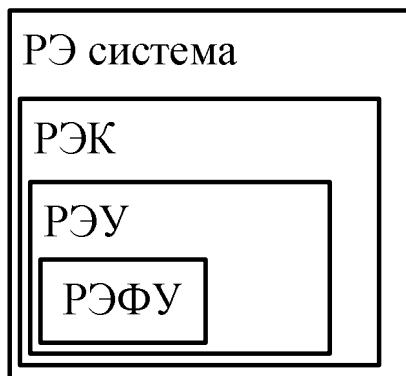


Рис. 2.1 — Уровни разукрупнения РЭС по функциональной сложности

Низшим уровнем является *радиоэлектронный функциональный узел (РЭФУ)* — функционально законченная сборочная единица, реализующая функцию преобразования сигнала, но не имеющая самостоятельного эксплуатационного применения. Примером РЭФУ может служить усилитель мощности музыкального центра.

РЭФУ входят в состав *радиоэлектронного устройства (РЭУ)*, которое реализует одну функцию или несколько функций преобразования информации и имеет самостоятельное эксплуатационное применение. Например, для музыкального центра уровень РЭУ — это конструктивно законченный полный усилитель с сетевым питанием.

Радиоэлектронный комплекс (РЭК) отличается свойством перестроения структуры с целью обеспечения функционирования. Музыкальный центр, включающий необходимый набор источников сигнала и акустических устройств, может служить примером РЭ комплекса.

Радиоэлектронная система (РЭ система) обладает свойством перестроения структуры с целью оптимизации параметров. Например, о спутниковой системе связи можно говорить только тогда, когда в ее составе будет достаточное количество спутников, наземных пунктов и пользователей: от момента создания минимального *комплекса* радиоэлектронных средств до начала коммерческого использования системы связи может пройти несколько лет.

РЭС можно также разукрупнить на составные части по конструктивным признакам, но соответствующая классификация требует дополнительных пояснений.

В основу разработки конструкции РЭС можно положить два основных принципа: *пространственно-индивидуальный* и *модульный*. В первом случае пространственное размещение элементов РЭС и элементы несущей конструкции (НК) выбираются и разрабатываются специально для конкретного изделия. Во втором случае для пространственного размещения элементов РЭС используют несущие конструкции со стандартизованными размерами — так называемые *базовые несущие конструкции (БНК)*. Кроме того, к сборочным единицам, называемым в этом случае *радиоэлектронными модулями (РЭМ)*, предъявляются требования конструктивной законченности и взаимозаменяемости. Пространственная координация в БНК строится на основе выбранного значения *геометрического*

модуля. Основные размеры БНК и РЭМ выбираются путем умножения модуля на целое число или на число, кратное 0,5. Так например, для печатных плат роль геометрического модуля играет шаг координатной сетки.

В классификации составных частей РЭС (таблица 2.1) общие наименования можно применять для любых конструкций.

Таблица 2.1 — Уровни разукрупнения РЭС по конструктивным признакам

Ур.	Составные части общие		Для модульной РЭА	
	Наименование	Несущая конструкция	БНК	Наименование
0	ЭРИ — электро-радиоизделия	—	—	РЭМ 0
1	РЭ ячейка	НК 1 — платы, рамки, лепестки, кронштейны	БНК 1	РЭМ 1
2	РЭ блок	НК 2 — шасси блока, лицевая панель, корпус	БНК 2	РЭМ 2
3	РЭ шкаф (стойка, пульт)	НК 3 — шасси шкафа, кожух, элементы связи с объектом-носителем	БНК 3	РЭМ 3

2.2. Жизненный цикл изделия как система

История изделия начинается с момента начала его производства, в то время как предыстория включает разработку изделия и подготовку его производства (рис. 2.2).

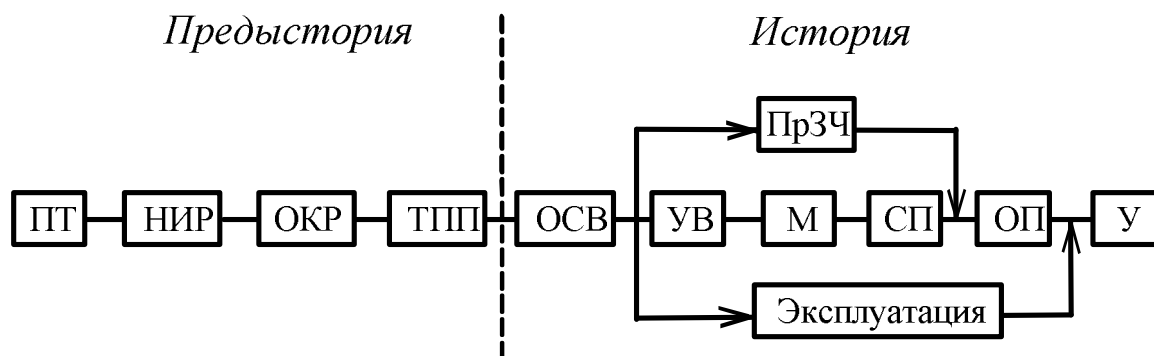


Рис. 2.2 — Схема жизненного цикла изделия

Разработка изделия начинается с технических предложений (ПТ), которые формулирует заказчик или которые составляются на основе общественной потребности. Это самые общие требования к основным характеристикам РЭС, являющиеся достаточными для начала научно-исследовательской работы (НИР). Исполнители НИР вначале, в контакте с заказчиком, формулируют техническое задание (ТЗ), которое содержит полный набор требований к РЭС. Собственно НИР составляют исследования, направленные на проверку возможности создания РЭС с требуемыми параметрами, на разработку структурной схемы, функциональной и принципиальной схем, а также основных конструктивных решений. Ре-

зультатами НИР являются эскизный проект (ЭП) и макет изделия, возможно, в нескольких вариантах. После испытаний макета или даже несколько ранее начинается этап опытно-конструкторских работ (ОКР), во время которого схемы и конструкция прорабатываются полностью. По результатам НИР разрабатывается технический проект (ТП) и выполняется опытный образец изделия, который проходит полные испытания. Если характеристики образца удовлетворяют предъявляемым требованиям, то создается рабочий проект (РП) — полный комплект документации, обеспечивающий возможность производства и эксплуатации изделия. На основе РП выполняется технологическая подготовка производства (ТПП), в ходе которой выбираются схемы технологических цепочек, разрабатываются технологические процессы, подготавливаются производственная база, материалы и комплектующие изделия, выполняется обучение персонала.

Производство изделия включает следующие этапы:

- освоение (ОСВ), отличающееся постепенным наращиванием объема выпуска при окончательной отработке технологии;
- устойчивый выпуск (УВ);
- модернизация (М);
- снятие с производства (СП).

Одновременно с основным производством начинается производство запасных частей (ПрЗЧ), которое продолжается некоторое время и после снятия с производства самого изделия, до момента полного окончания производства (ОП).

Эксплуатация изделия начинается практически одновременно с его освоением, а после снятия с эксплуатации производится (У) утилизация выработавших свой ресурс изделий. Отметим, что в настоящее время ресурс изделия может быть ограничен не только физическим, но и моральным износом.

Таким образом, жизненный цикл изделия удовлетворяет определению понятия «техническая система» и обладает всеми ее свойствами. Благодаря системному подходу можно оптимизировать жизненный цикл исходя из современных и перспективных требований к РЭС, например, как уже упоминалось, в какой-то мере объединить этапы НИР и ОКР с целью сократить продолжительность разработки.

2.3. Классификация РЭА по объектам-носителям

Условия эксплуатации РЭС в значительной степени определяются условиями на объекте-носителе (таблица 2.2). Представление об условиях эксплуатации РЭА на различных объектах дает таблица 2.3, составленная на основе ГОСТ 15150-69.

Таблица 2.2 — Виды РЭА по объектам-носителям

Классы	Наземная РЭА	Морская РЭА	Бортовая РЭА
Под- классы, виды	Стационарная: — для отапливаемых помещений; — для неотапливаемых помещений; — для открытого воздуха; — бытовая.	Судовая: — для больших судов; — для малых судов.	Авиационная: — для самолетов; — для вертолетов.
	Мобильная: — для колесного транспорта; — для гусеничного транспорта; — железнодорожная.	Корабельная: — для подводных кораблей; — для специальных помещений.	Ракетная.
	Носимая: — специальная; — бытовая.	Буйковая.	Космическая.
			Для арснарядов.

Таблица 2.3 — Стандартные параметры внешних воздействий

Группа РЭА	T _{мин} , °C	T _{макс} , °C	ОВ %	Вибрация		АД, кПа	Дополнит. условия
				F _н ...F _в , Гц	a, м/с ²		
Стационарная, отапл. помещ.	–40	+55	80	10...30	19,6	61	—
Стационарная, откр. воздух	–40	+60	93	10...30	19,6	61	Иней, роса, дождь, пыль
Возимая, авто-моб. транспорт	–40	+60	93	4...80	78,5	61	Иней, роса, дождь, пыль
Возимая, жел-дор. транспорт	–40	+60	93	2...100	19,6	61	Иней, роса, дождь, пыль
Судовая, боль-шие суда	–40	+60	93	5...150	59	61	Иней, роса, дождь, пыль
Носимая для от-крытого воздуха	–40	+60	93	10...70	37	61	Иней, роса, дождь, пыль
Носимая для отапл. помещ.	–40	+55	80	10...30	10,7	61	—
Самолетная	–40	+60	100	5...2000	196	2	Иней, роса, дождь, пыль

Примечание. ОВ — относительная влажность воздуха, АД — атмосферное давление.

3. СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА РЭС

3.1. Виды показателей качества

По уровню различают **обобщенные** и **конкретные** (технические) показатели. Обобщенными считаются те показатели, которые определяются совокупностью конкретных показателей и характеризуют изделие в целом.

По способу оценки можно выделить:

- количественные, задаваемые конкретными числовыми значениями;
- ранжируемые, значения которых условны и определяются методом экспертной оценки;
- репрезентативные, задаваемые по принципу «да — нет» или «имеется — отсутствует».

3.2. Обобщенные показатели

К обобщенным показателям можно отнести:

- качество и эффективность;
- надежность;
- технологичность.

Качество РЭС определяется по уровню соответствия технических параметров заложенным в технических условиях (ТУ) требованиям.

Техническая эффективность оценивается по реализованному вкладу в удовлетворение общественной потребности в изделиях данного вида или в формирование этой потребности.

Экономическая эффективность связана с коммерческим успехом производителя. Ее может обеспечить только конкурентоспособное изделие, то есть изделие, обладающее следующими свойствами:

- мировой уровень качества с учетом состояния рынка и перспектив его развития;
- приемлемая для потребителя цена;
- укрепление доверия к фирме;
- низкие эксплуатационные затраты потребителя;
- преимущество потребителя данного изделия по сравнению с потребителями аналогичных изделий других фирм (например, благодаря развитой сети сервисных центров).

Надежность — сложное понятие, связанное с возможностью для изделия выполнять свои функции.

РЭС во время эксплуатации может находиться в трех состояниях:

- работоспособном (Р/С): в данный момент работающем или способном выполнять свои функции немедленно после включения;
- исправном (И), но неработоспособном по условиям хранения или эксплуатации (например, разобранном для хранения);
- неисправном (Н/И).

Переходами между этими состояниями являются:

- эксплуатация (техническое обслуживание, перевозка, хранение);
- отказ — нарушение работоспособности;
- дефект — нарушение исправности;

— ремонт — восстановление работоспособности или исправности.

Представление о состояниях РЭС и переходах дает следующая диаграмма (рис. 3.1). Классификация отказов приведена в таблице 3.1.

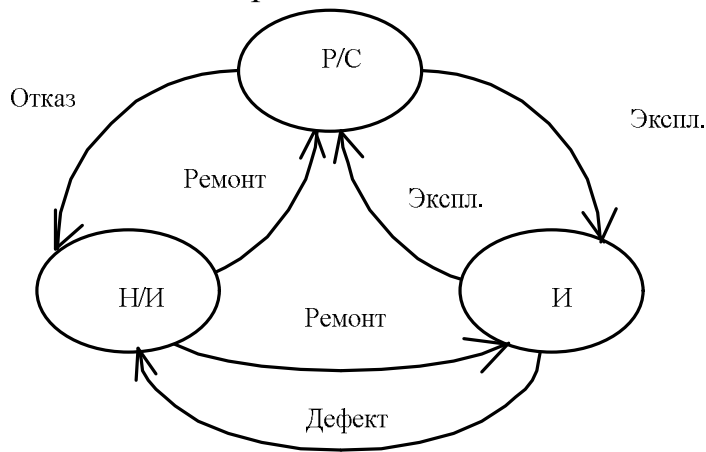


Рис. 3.1 — Диаграмма состояний РЭС и переходов между ними

Таблица 3.1 — Классификация отказов

Классификационные параметры	Виды отказов
1. Влияние на функции.	1.1. Отказы по основным функциям. 1.2. Отказы по второстепенным функциям.
2. Характер проявления.	2.1. Внезапные. 2.2. Постепенные (параметрические).
3. Временные характеристики.	3.1. Постоянные. 3.2. Самоустраняющиеся: — кратковременные (сбои); — перемежающиеся.
4. Взаимозависимость.	4.1. Независимые. 4.2. Спровоцированные: — одиночные; — катастрофические (ремонт нецелесообразен).
5. Причины возникновения (место в жизненном цикле).	5.1. Элементная база. 5.2. Ошибки разработчика. 5.3. Ошибки технолога. 5.4. Нарушения технологии. 5.5. Нарушения условий эксплуатации. 5.6. Неотождествленные причины.

Надежность характеризуют по совокупности следующих свойств:

а) **безотказность** — отсутствие отказов на протяжении определенного времени наработки;

б) **стабильность параметров** — отсутствие недопустимого ухода параметров на протяжении определенного времени наработки;

в) **отказоустойчивость** — работоспособность при наличии отказов отдельных элементов;

г) **сохраняемость** — сохранение исправности и допустимых значений параметров в течение определенного срока хранения;

д) **ремонтпригодность** — низкий уровень затрат на демонтаж с объекта-носителя, поиск и устранение неисправностей;

е) **долговечность** — обеспечение определенного срока службы при заданном режиме использования (работа — хранение — транспортировка), эксплуатации и ремонта.

Технологичность характеризуют величиной и структурой затрат; при этом разделяют **производственную** и **эксплуатационную** технологичность.

В производственные затраты входят:

- капитальные затраты;
- трудовые затраты;
- стоимость материалов и комплектующих изделий;
- затраты на разработку и технологическую подготовку производства;
- текущие издержки (оплата электроэнергии, воды и т.п.).

Высокой технологичностью будет обладать изделие с приемлемой величиной затрат, причем структура затрат (соотношение между отдельными видами) должна соответствовать достигнутому мировому уровню и объему выпуска изделия. Так например, если изделие выпускается малыми сериями, то специализированные технологии (литье, штамповка), требующие больших затрат на подготовку оборудования, применять нецелесообразно.

Эксплуатационную технологичность определяют затраты на перевозку, хранение, развертывание на объекте-носителе и демонтаж изделия, текущие затраты, связанные с использованием по назначению, затраты на техническое обслуживание и ремонт.

3.3. Технические показатели (требования к конструкции)

3.3.1. Устойчивость к климатическим воздействиям

К климатическим воздействиям относятся температура, влажность и давление воздуха, солнечная радиация, осадки, гидростатическое давление (для водной окружающей среды), пыль, биологические воздействия (плесень, насекомые, грызуны), ионизирующее излучение (естественного и техногенного происхождения).

Устойчивость к ним характеризуется интенсивностью (уровнем), причем вид характеристики и ее числовое значение определяются видом воздействия, и временем экспозиции. Например, аварийный радиобуй системы КОСПАС–САРСАТ должен выдерживать погружение на глубину 10 м в течение 1 часа. Это не значит, что при более длительной выдержке герметичность его нарушится, но данные ограничения позволяют организовать испытания буя на герметичность.

3.3.2. Прочность и устойчивость к механическим воздействиям

Прочность — способность сохранять исправное состояние в течение срока службы. Аппаратура может работать или не работать во время механических воздействий.

Устойчивость к механическим воздействиям — способность сохранять работоспособность во время действия механических сил.

К механическим воздействиям относятся: вибрация, удары, линейные и центробежные ускорения, акустические воздействия (длительный шум или удары), ветровые нагрузки. Особенности этих видов отражены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 — Характеристики механических воздействий

Наименование	Длительность	Периодичность	Характеристики
1. Вибрация	+	+	Форма: — синусоидальная; — несинусоидальная. Период T , основная частота $f_1 = 1/T$ (для синусоидальной вибрации — единственная), частоты гармоник $f_n = nf_1$, амплитуды виброускорения a_i ($i = 1, 2 \dots n$).
2. Удары	—	—	Форма, длительность ударного импульса τ , условная ударная частота $f_{уд} = 1 / 2\tau$, амплитуда ускорения $a_{уд}$.
2. Линейные и центробежные ускорения	+	—	Ускорение a , перегрузка $N = a / g$ (g — ускорение свободного падения).
3. Акустические воздействия	+ или —	—	Звуковое давление $P_{зв}$, уровень $N_{зв} = 20 \lg P_{зв} / p_0$ ($p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Н/м}^2$).
4. Ветровые нагрузки	+	—	Скорость ветра V , полная аэродинамическая сила $R = C_\alpha S \frac{\rho V^2}{2}$, где C_α — коэффициент формы (для плоской пластины равен 1); S — площадь миделевого сечения (в самом широком месте); ρ — плотность воздуха (у земли при нормальных условиях $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$).

3.3.3. Экологические требования

Эти требования ограничивают уровень загрязняющих факторов при производстве, эксплуатации и утилизации РЭС. К этим факторам относятся:

- электромагнитное излучение и магнитное поле;
- конструкционные материалы (например, ртутьсодержащие);
- химические вещества покрытий и заполнений;
- вещества, выделяемые при работе РЭС (например, озон и закись азота);
- шум, пыль, вибрации и т.п.

3.3.4. Требования системы «человек-машина»

Требования **техники безопасности** (ТБ) устанавливаются на опасные факторы, которые могут привести к травмам персонала. Основные опасные факторы, характерные для РЭА: электрическое напряжение, электромагнитное поле высокой интенсивности, движущиеся части механизмов.

Требования **промсанитарии** касаются вредных факторов, длительное воздействие которых приводит к профессиональным заболеваниям. К вредным факторам относятся, например, электромагнитное поле малой интенсивности, шум, вибрация, яркий свет, недостаточная освещенность, сквозняки и т.д.

Кроме защиты персонала от опасных и вредных факторов существенна проблема защиты РЭА **от неквалифицированного воздействия**, так называемая система «*fool-proof*» (в дословном переводе «защита от дурака»). Данную систему составляют технические меры (например, устройство отключения высоких напряжений при открытии дверцы шкафа) и организационные меры (например, предупредительные надписи).

Требования **эргономики** направлены на обеспечение удобства работы человека-оператора с учетом его психофизиологических особенностей. Например, эргономика определяет размеры рабочей зоны оператора, размещение органов управления и индикации, усилия на переключателях и кнопках, цвета световых индикаторов и т.п.

Требования **технической эстетики** позволяют обеспечить привлекательный внешний вид устройства. К ним относятся рациональность формы, выразительность и совершенство дизайна, следование тенденциям моды.

3.3.5. Требования стандартизации и унификации

Существуют различные виды **стандартов**.

Международные стандарты носят рекомендательный характер (в силу политических причин). Они принимаются на договорной основе, но отступление от них каждой стране крайне невыгодно: во-первых, теряется возможность эффективного участия в международных проектах, во-вторых, снижается конкурентоспособность продукции страны на мировом рынке.

Государственные стандарты определяют обязательные к применению нормы. В частности, стандарты бывшего СССР, обозначаемые сокращением ГОСТ, действуют и на территории Украины до их замены национальными. Стандарты Украины обозначаются сокращениями ГСТУ (русскоязычный вариант) и ДСТУ (украиноязычный вариант).

Отраслевые стандарты (ОСТ) определяют обязательные к применению нормы в пределах данной отрасли промышленности и вида продукции.

Стандарты предприятий (СТП) являются обобщением опыта данного предприятия, поэтому носят рекомендательный характер в отношении новой техники: разработчик может вносить предложения по совершенствованию этих стандартов.

Унификация — применение в разрабатываемой продукции узлов и деталей из определенного набора. Этот набор выделяют из всего многообразия сходных изделий путем **типизации** — выделения подобных друг другу (типовых) техни-

ческих решений. Затем выполняется разработка унифицированных конструкций форма и размеры которой берутся за основу при разработке конкретных изделий.

3.3.6. Патентно-правовые требования

Предметом хозяйственного права являются:

а) авторское право:

- открытия (новый физический эффект или явление природы);
- изобретения (новое техническое решение, обладающее раннее неизвестной совокупностью существенных признаков, дающее положительный эффект);
- интеллектуальная продукция (программы для ЭВМ, аудио-видеопродукция, внешний вид изделия);

б) промышленная собственность:

- изобретения;
- промышленные образцы;
- товарные знаки;
- секрет производства (ноу-хау).

Для правовой защиты этих объектов используются следующие документы:

- патенты и сертификаты, определяющие исключительные права собственника;
- лицензии, на основании которых передается часть прав или все права другим физическим или юридическим лицам.

С правовой точки зрения выделяют следующие свойства изделия:

а) охраноспособность — наличие признаков авторского права или промышленной собственности, которые могут быть защищены юридически;

б) патентоспособность — охраноспособность в отношении собственности, на которую выдается патент;

б) патентная чистота — отсутствие патентуемых технических решений, заимствованных без ведома собственника патента (без лицензии или другого разрешительного документа).

ЧАСТЬ 2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЭА

4. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ РЭС И ЕГО ОБЕСПЕЧЕНИЕ

4.1. Основные определения

Тепловом полем РЭС называется пространственно-временное распределение температур во всем объеме, занимаемом его элементами. Данное понятие является математическим, на практике достаточно знать температуры в характерных зонах конструкции.

Тепловым режимом РЭС называется пространственно-временное распределение температур в нагретых зонах и критических точках. Под нагретой зоной понимают часть объема изделия, температура в которой может быть усреднена. Критическими называют те точки объема, температура которых определяет работоспособность изделия. Это могут быть не только теплонагруженные элементы, отказ которых вызывается перегревом сверх допустимых пределов, но и те элементы, температура которых определяет значения основных параметров изделия (например, кварцевый резонатор задающего генератора).

При конструировании возникают две основные задачи:

а) задача анализа теплового режима: при заданных внешних условиях и рассеиваемой мощности определить распределение температур в нагретых зонах и критических точках;

б) задача обеспечения теплового режима: выбор элементной базы и поиск конструктивных решений, которые бы обеспечивали выполнение ограничений на параметры теплового режима.

Системой обеспечения теплового режима (СОТР) называется комплекс конструктивных решений, специально направленных на обеспечение теплового режима.

4.2. Связь теплового режима с электрическим

Повышение температуры элемента связано с переходом электрической энергии, характеризуемой рассеиваемой мощностью P , в тепловую. Очевидно, что сразу после включения РЭС начнется только повышение температуры элементов. Тепловой поток Q в окружающую среду, измеряемый в единицах мощности, вначале будет незначительным. Через некоторое время, называемое **временем тепловой инерции** $t_{\text{ти}}$, тепловой поток сравняется с рассеиваемой мощностью, а значит, изменение температуры прекратится (рис. 4.1).

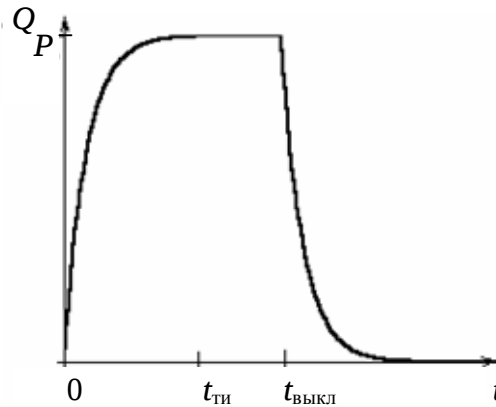


Рис. 4.1 — Зависимость теплового потока от времени

Для интервала $t < t_{\text{ти}}$ тепловой поток $Q(t) < P$, происходит разогрев элементов внутри корпуса изделия: режим называется **нестационарным**, так как температура еще не установилась.

Начиная с момента $t_{\text{ти}}$ и до момента выключения $t_{\text{выкл}}$ $Q(t) = P$, режим называется **стационарным**: он характеризуется постоянством температуры.

После выключения $P = 0$, происходит остывание элементов, режим снова становится **нестационарным**: $Q(t) \rightarrow 0$.

При **периодическом** включении и выключении аппаратуры тепловой режим сводится либо к стационарному, либо к нестационарному — в зависимости от соотношением между временем работы и временем тепловой инерции.

4.3. Анализ теплового режима

4.3.1. Общее уравнение теплопередачи и его электротехническая аналогия

Известны три механизма теплопередачи: теплопроводность, конвекция и излучение. Их общие закономерности можно описать обобщенным уравнением

$$Q = Q_{\text{Т}} + Q_{\text{К}} + Q_{\text{И}} = \alpha S \Delta T,$$

где $Q_{\text{Т}}$, $Q_{\text{К}}$, $Q_{\text{И}}$ — тепловые потоки теплопроводности, конвекции и излучения, соответственно;

α — обобщенный коэффициент теплопередачи;

S — характерная площадь, участвующая в теплопередаче;

ΔT — разность между температурой рассматриваемого тела T_1 и температурой второго тела T_2 , участвующего в теплопередаче.

Данное уравнение по структуре напоминает уравнение закона Ома, что позволяет построить аналогию между соотношениями, описывающими теплопередачу и электротехнические закономерности (таблица 4.1).

Таблица 4.1 — Электротехническая аналогия для теплопередачи

Электротехника	Теплопередача
Закон Ома: $I = U / R$	$Q = \alpha S \Delta T$
Ток I , А	Тепловой поток Q , Вт
Разность потенциалов (напряжение) U , В	Разность температур ΔT , К или °С
Сопротивление $R = U / I$, В/А = Ом	Тепловое сопротивление $R_T = \Delta T / Q$, К/Вт или °С/ Вт
Проводимость $G = 1 / R = I / U$, А/В = Сим	Тепловая проводимость $Y_T = 1 / R_T = Q / \Delta T$, Вт/К
Напряжение на емкости $u(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$	Разность температур на тепловой емкости $\Delta T(t) = \frac{1}{C_T} \int Q(t) dt$
Емкость C , А·с/В = Ф	Тепловая емкость C_T , Дж/К
Постоянная времени RC -цепи $\tau = RC$, с	Постоянная времени тепловой инерции $\tau_{ти} = R_T C_T$, с
Источник тока J , А	Источник теплового потока P , Вт
Общая шина	Окружающая среда

Важнейшим из перечисленных понятий является **тепловое сопротивление**.

При стационарном тепловом режиме значение теплового сопротивления показывает, на сколько градусов изменится температура при изменении рассеиваемой мощности на 1 ватт.

Из электротехнической аналогии (законов Кирхгофа) также следует, что наличии на пути теплового потока каких-либо других тел их тепловые сопротивления складываются (последовательное соединение), а при нескольких путях для теплового потока из какой-то точки следует использовать параллельное соединение их тепловых сопротивлений.

Таким образом, задача анализа теплового режима может быть решена следующим образом:

- внутри корпуса устройства выделяются источники теплового потока с заданными значениями рассеиваемой мощности;
- выделяются нагретые зоны и критические точки, где температуры должны быть определены;

- между источниками, выделенными точками и окружающей средой анализируются механизмы теплопередачи и определяются значения тепловых сопротивлений и емкостей;
- составляется эквивалентная тепловая цепь, учитывающая виды соединений тепловых сопротивлений и емкостей;
- способами электротехники анализируется полученная цепь с целью получить распределение температур.

Для примера на рисунке 4.2 рассмотрен случай мощного диода, расположенного на прикрепленной к корпусу пластине через две изолирующие прокладки (рис. 4.2 а). Стрелками показаны тепловые потоки от $p-n$ перехода в окружающую среду. Тепловую цепь составляют источник P , тепловые сопротивления прокладок $R_{П1}$, $R_{П2}$, стержня R_C , гайки R_G , пластины $R_{ПЛ}$, корпуса конвективное $R_{КК}$ и корпуса излучения $R_{КИ}$ (рис. 4.2 б).

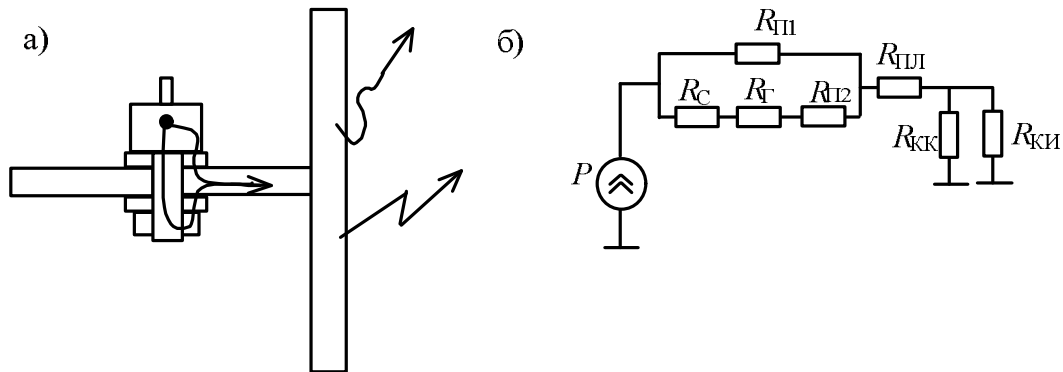


Рис. 4.2 — Пример к анализу теплового режима:
а) пространственная схема; б) эквивалентная тепловая цепь.

Если тепловой режим является стационарным, то тепловые емкости в рассмотрение не вводят. Их определяют при необходимости оценить время тепловой инерции. Если рабочий режим является нестационарным, то вместо источника с рассеиваемой мощностью P берут эквивалентный стационарный источник с уменьшенной мощностью $P_{\text{экв}}$, которая определяется соотношением между временем работы t_p и постоянной времени тепловой инерции $\tau_{\text{ти}}$

$$P_{\text{экв}} = P \left(1 - e^{-\frac{t_p}{\tau_{\text{ти}}}} \right).$$

Тепловые емкости элементов находят как произведения удельных теплоемкостей (справочные величины) на массы элементов. Всю цепь путем применения методов электротехники сводят к эквивалентной RC -цепи (рис. 4.2).

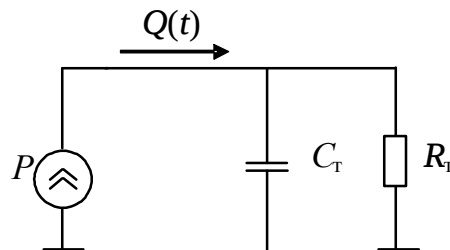


Рис. 4.2 — Эквивалентная цепь для расчета нестационарного теплового режима

Результаты анализа такой цепи известны из электротехники. Тепловой поток $Q(t)$ и разность температур $\Delta T(t)$ равны

$$Q(t) = P \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ти}}}} \right); \quad \Delta T(t) = \frac{P}{R_T} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ти}}}} \right), \quad \tau_{\text{ти}} = R_T C_T.$$

Таким образом, при анализе теплового режима основную трудность представляет определение тепловых сопротивлений: необходимо обращаться к известным физическим соотношениям для конкретных видов теплопередачи.

4.3.2. Теплопередача теплопроводностью

Теплопроводность — основной механизм теплопередачи между твердыми телами.

Пусть тело 1 имеет температуру T_1 , тело 2 — температуру T_2 . Между телами имеется проводник тепла в виде прямоугольного бруса с площадью сечения S , длиной L (рис. 4.3).

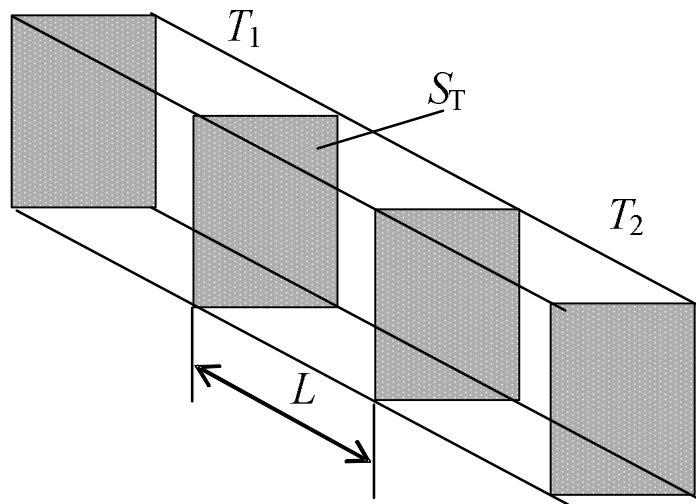


Рис. 4.3 — К пояснению процесса теплопроводности

Тепловой поток Q между телами 1 и 2 равен

$$Q = \alpha_T S_T \Delta T = \frac{\lambda_T}{L} S_T \Delta T,$$

где α_T — коэффициент теплопередачи теплопроводностью;

λ_T — коэффициент теплопроводности (справочная величина);

S_T — площадь сечения теплопроводящего тела;

$$\Delta T = T_1 - T_2.$$

Значения коэффициентов теплопроводности некоторых материалов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 — Коэффициенты теплопроводности материалов

Материал	λ_T , Вт/м · К	Материал	λ_T , Вт/м · К
Медь	380	Слюда	0,45
Алюминий	200	Фторопласт-4	0,25
Латунь	105	Текстолит	0,27
Сталь	45	Воздух	0,024

Видно, что неметаллические материалы имеют примерно на два порядка меньшие значения коэффициента теплопроводности, а теплопроводность воздуха меньше еще на порядок. Правда, для реализации теплоизолирующих свойств воздуха необходимо исключить возможность его перемешивания.

4.3.3. Теплопередача конвекцией

Процесс конвекции возможен для тел, частицы которых могут перемещаться. Прежде всего это газы и жидкости, однако сыпучие твердые тела этим свойством также обладают.

Подразделяют два вида конвекции: естественную, при которой перемешивание происходит под действием естественных физических процессов, и принудительную, когда перемешивание вызывается специальными техническими устройствами (рис. 4.4).

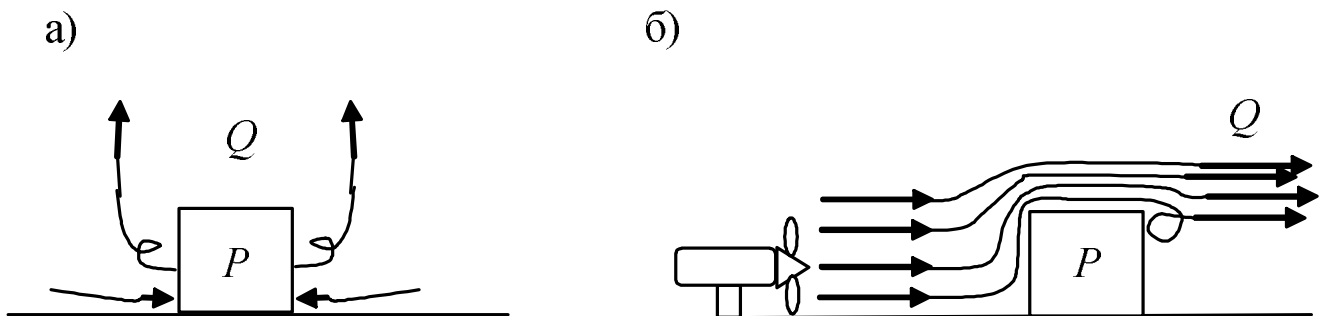


Рис. 4.4 — Естественная (а) и принудительная (б) конвекция

Если внутри корпуса устройства рассеивается мощность P , то стенки корпуса начинают нагреваться. Близлежащие частицы воздуха также нагреваются от стенок. Если внешнего обдува нет, то из-за повышения температуры плотность воздуха в нагретом объеме уменьшается, и на этот объем начинает действовать архимедова выталкивающая сила, в результате чего нагретые частицы начинают подниматься вверх, а их место занимают ненагретые частицы. Так возникает естественное перемешивание воздуха (рис. 4.4а).

Если имеется искусственный источник движения частиц воздуха (вентилятор), то нагретые и ненагретые частицы воздуха перемешиваются принудительно (рис. 4.4б). Аналогичные процессы могут происходить и в случае других газов или жидкостей.

Величина теплового потока конвекции Q_K определяется соотношением

$$Q_K = \alpha_K (T_1, T_2, a_1, a_2 \dots) S_K \Delta T,$$

где $\alpha_k(T_1, T_2, a_1, a_2 \dots)$ — коэффициент теплопередачи конвекцией;

S_k — площадь, участвующая в конвекции;

ΔT — разность температур тела и окружающей среды.

Значения коэффициента теплопередачи конвекцией α_k зависят от температуры тела T_1 и температуры окружающей среды T_2 , а также от ряда параметров среды a_1, a_2 и т.д. В качестве основных параметров можно выделить:

- коэффициент теплопроводности;
- удельную теплоемкость;
- коэффициент кинематической вязкости;
- коэффициент объемного расширения;
- коэффициент температуропроводности;
- скорость потока;
- число Рейнольдса;
- степень шероховатости поверхности.

Так например, значение числа Рейнольдса позволяет установить характер обтекания тела. При **ламинарном** обтекании струи теплоносителя не перемешиваются. При турбулентном обтекании образуются вихри, которые вызывают интенсивное перемешивание теплоносителя. Существует также обтекание **переходного** типа. Зависимость коэффициента теплопередачи конвекцией от температуры тела определяется характером обтекания (рис. 4.5).

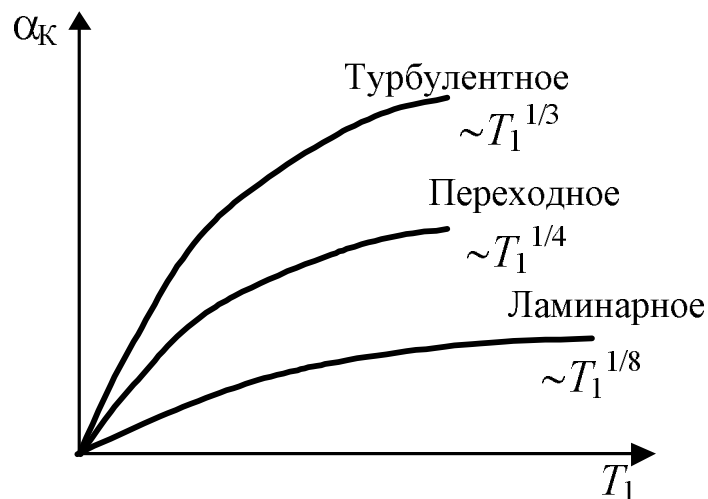


Рис. 4.5 — Характер зависимости коэффициента теплопередачи конвекцией от температуры тела

Из-за сильной зависимости интенсивности конвекции от температуры тепловые сопротивления в эквивалентных схемах становятся нелинейными, что усложняет анализ теплового режима.

Характерные значения коэффициента теплопередачи конвекцией для некоторых видов теплоносителя приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 — Пределы изменения значений коэффициента теплопередачи конвекцией

Вид теплоносителя	α_k , Вт/м ² К
Воздух при нормальном атмосферном давлении	1...50
Масло трансформаторное	50...1500
Вода	200...10000
Вода с кипением	500...45000

Из приведенных данных видно, что в зависимости от вида конвекции (естественная или принудительная) и конкретных условий интенсивность отвода тепла может изменяться в широких пределах. Теоретический расчет значений коэффициента α_k можно провести путем решения системы критериальных уравнений, в которую входят критерии Нуссельта, Рейнольдса, Графсгофа, Пекле и Прандтля. Соответствующие рекомендации можно найти в справочной литературе [1].

4.3.4. Теплопередача излучением

Известно, что всякое тело с температурой T_1 , отличной от абсолютного нуля, излучает в пространство электромагнитное поле. Для реального тела, не являющегося абсолютно черным, тепловой поток излучения в направлении другого тела с температурой T_2 можно определить с помощью соотношения

$$Q_{\text{и}} = \alpha_{\text{и}}(T_1, T_2) S_{\text{и}} \Delta T = \varphi_{12} \varepsilon \cdot f(T_1, T_2) S_{\text{и}} \Delta T,$$

где $\alpha_{\text{и}}(T_1, T_2)$ — коэффициент теплопередачи излучением;

$S_{\text{и}}$ — площадь, участвующая в излучении;

$\Delta T = T_1 - T_2$;

φ_{12} — коэффициент перекрытия излучения: $\varphi_{12} = \Omega_{12}/4\pi$;

Ω_{12} — телесный угол перекрытия;

ε — приведенная степень черноты;

$f(T_1, T_2)$ — функция, описывающая излучение абсолютно черного тела:

$$f(T_1, T_2) = 5,67 \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2}.$$

Для примера приведем ряд значений приведенной степени черноты:

— алюминий полированный $\varepsilon \approx 0,05$;

— алюминий окисленный $\varepsilon \approx 0,2...0,3$;

— краски, эмали глянцевые $\varepsilon \approx 0,78...0,96$.

Интересно отметить, что краски и эмали значительно повышают степень черноты металлов независимо от цвета, так как на степень черноты в значительно большей мере влияет характер поверхности.

4.4. Обеспечение теплового режима

4.4.1. Классификация систем обеспечения теплового режима

Данную классификацию удобно представить в виде таблицы (таблица 4.4).

Таблица 4.4 — Классификация систем обеспечения теплового режима

Классификац. параметр	Виды СОТР, их характеристика
1. Пределы поддержания температур.	1.1. $T \leq T_{\text{макс}}$ (ограничение сверху) — системы <i>охлаждения</i> . 1.2. $T_{\text{мин}} \leq T \leq T_{\text{макс}}$ (ограничение с двух сторон) — системы <i>термостабилизации</i> . 1.3. $T = T_{\text{ном}} \pm \Delta T$ (поддержание номинальной температуры с высокой точностью) — системы <i>термостатирования</i> .
2. Охват нагретой зоны	2.1. Общие. 2.2. Локальные.
3. Режим во времени	3.1. Стационарные. 3.2. Нестационарные.
4. Способ теплопередачи	4.1. С использованием теплопроводности. 4.2. Конвективные. 4.3. С использованием излучения. 4.4. Комбинированные.
Дополнительная классификация конвективных СОТР	
4.2. По виду теплоносителя	4.2.1. С газовым теплоносителем. 4.2.2. С жидким теплоносителем. 4.2.3. С кипением жидкости.
4.2. По способу перемешивания	а) С естественным перемешиванием. б) С принудительным перемешиванием: 1) приточные; 2) вытяжные; 3) вентиляции (приточно-вытяжные).

4.4.2. Выбор и расчет систем обеспечения теплового режима

На ранней стадии проектирования выбирают предварительно общую компоновку изделия, исходя из основных массогабаритных и энергетических параметров. Затем определяют, с помощью какой СОТР можно обеспечить тепловой режим.

Рассмотрим основную задачу: выбор системы охлаждения. Исходными данными для этой задачи являются:

- предельная допустимая температура $T_{\text{макс}}$;
- максимальная температура окружающей среды T_0 ;
- рассеиваемая мощность P ;
- максимальная высота размещения изделия над уровнем моря H ;
- размеры корпуса, его объем V и коэффициент заполнения корпуса по объему k_v .

Вначале выбирают модель нагретой зоны, прежде всего, форму зоны внутри корпуса. Чаще всего считают, что нагретая зона заполняет весь периметр корпуса, а по высоте — только часть (рис. 4.6).

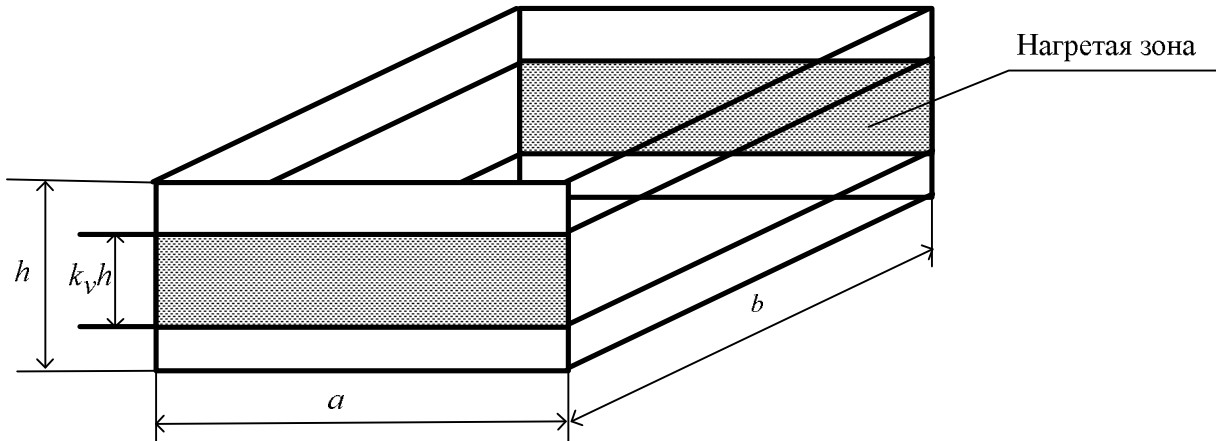


Рис. 4.6 — Расчетная модель нагретой зоны

В этом случае площадь нагретой зоны S_3 равна

$$S_3 = S_k k_v,$$

где S_k — площадь поверхности корпуса: $S_k = 2[a \cdot b + h(a + b)]$.

Для выполнения количественных оценок рассчитывают условную плотность теплового потока q

$$q = \frac{P \cdot k_H}{S_3},$$

где k_H — поправочный коэффициент, учитывающий высоту установки объекта над уровнем моря [2]. На уровне моря $k_H = 1$; с ростом высоты значения k_H увеличиваются, что вызвано снижением охлаждающей способности воздуха.

Затем находят величину максимального перегрева $\Delta T = T_{\max} - T_0$ и логарифм величины q , выраженной в ваттах на квадратный метр. Для выбора подходящего способа охлаждения используют график из [2], полученный на основании опыта проектирования РЭА во многих организациях (рис. 4.7).

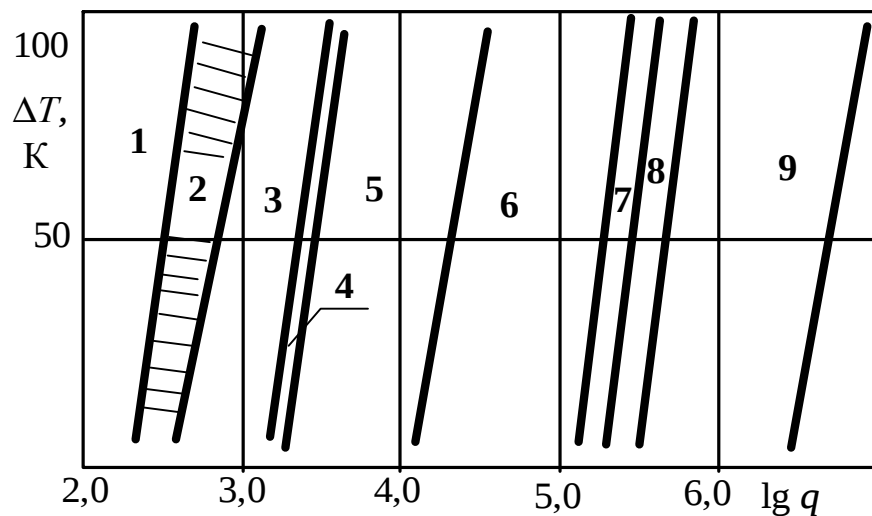


Рис. 4.7 — Кривые для выбора способа охлаждения

Значения ΔT и q определяют положение точки, которая попадает в одну из отмеченных на графике зон. По номеру зоны определяют подходящий способ охлаждения:

- 1) естественное воздушное охлаждение (ЕВО);
- 2) ЕВО или принудительное воздушное охлаждение (ПВО);
- 3) ПВО;
- 4) ПВО или естественное жидкостное охлаждение (ЕЖО);
- 5) ЕЖО;
- 6) ЕЖО или принудительное жидкостное охлаждение (ПЖО);
- 7) ПЖО или естественное испарительное охлаждение (ЕИО);
- 8) ЕИО или принудительное испарительное охлаждение (ПИО);
- 9) ПИО.

В тех случаях, когда точка попадает в зоны с двумя возможными видами охлаждения, выполняется дополнительная вероятностная оценка. Например, для зоны 2 используют следующие вероятностные кривые (рис. 4.8).

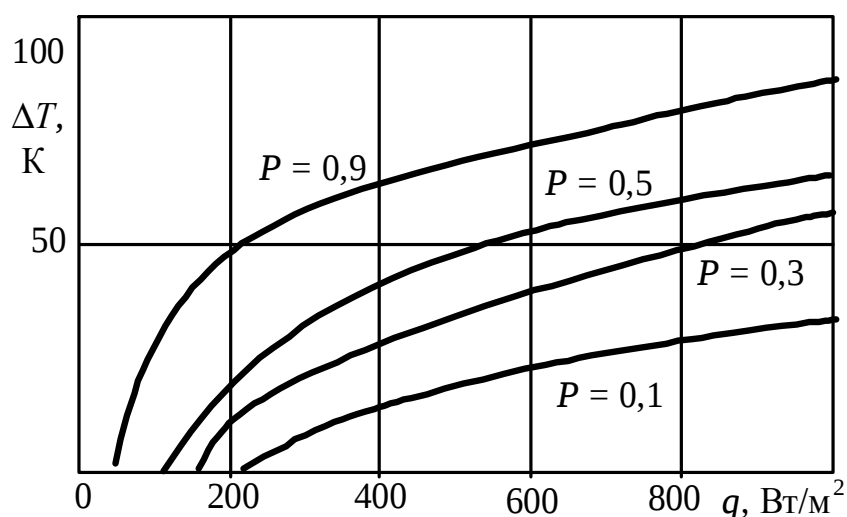


Рис. 4.8 — Вероятностные кривые для ЕВО изделия в перфорированном корпусе

Положение точки указывает кривую с определенной вероятностью обеспечить тепловой режим выбранным способом. Если вероятность $P > 0,5$, то режим обеспечить нетрудно. При $0,5 \geq P \geq 0,3$ тепловой режим, скорее всего, удастся обеспечить, выполнив два-три варианта конструкции. Если $0,3 > P \geq 0,1$, то для обеспечения режима, возможно, понадобится несколько вариантов конструкции, что может быть экономически нецелесообразно. При $P < 0,1$ данный вид СОТР применить практически невозможно: следует выбирать более эффективные системы.

В процессе выбора конструкции выполняют не только расчеты теплового режима, на часто и экспериментальные исследования. Можно сказать, что задачу синтеза СОТР решают методом последовательных приближений, используя теоретические модели для анализа тепловых цепей и макетные варианты конструкции для проверки принятых решений.

4.4.3. Некоторые элементы систем обеспечения теплового режима

При разработке конструкции учитывают тепловую нагруженность отдельных узлов. Очевидно, что элементы с высокой рассеиваемой мощностью будут нуждаться в *локальных теплоотводах*, и поэтому задачу обеспечения их теплового режима целесообразно рассматривать отдельно.

Так например, отдельные мощные элементы можно вынести в такие зоны, где обеспечивается хороший обдув воздухом или где можно распределить тепловой поток по большой площади. Этим условиям удовлетворяют стенки корпуса и специальные теплоотводы: радиаторы, тепловые трубки, элементы Пельтье и другие подобные решения.

Если в качестве радиатора берется плоская пластина и обеспечивается хороший тепловой контакт между ней и теплонагруженным элементом, то расчетным или экспериментальным путем можно получить зависимости теплового сопротивления и тепловой проводимости такого радиатора (рис. 4.9).

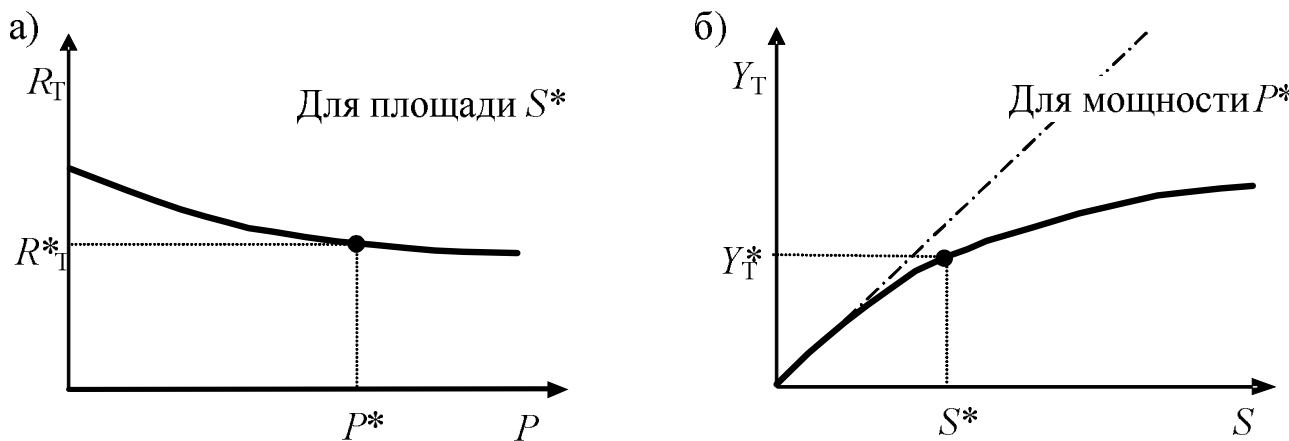


Рис. 4.9 — Зависимость теплового сопротивления от мощности (а) и зависимость тепловой проводимости от площади (б) для плоского радиатора

С ростом мощности при одной и той же площади увеличивается температура радиатора, увеличивается разность плотностей нагретого и ненагретого воздуха, возрастает толщина нагретого слоя, а следовательно, и объем воздуха, участвующего в конвекции. Это приводит к возрастанию эффективности конвекции: коэффициент теплопередачи конвекцией возрастает (см. рис. 4.5), тепловое сопротивление уменьшается (см. рис. 4.9а).

Если мощность зафиксировать, а увеличивать площадь радиатора, то вначале тепловой поток будет расти прямо пропорционально площади. Такой же вид имеет начальный участок зависимости тепловой проводимости от площади (см. рис. 4.9б). Однако, поскольку источник тепла — точечный, а с каждого элемента поверхности часть теплового потока уходит, с ростом размеров радиатора начинает проявляться неравномерность нагрева радиатора: во-первых, каждый следующий элемент поверхности рассеивает меньшую мощность, а во-вторых, при меньшем перегреве уменьшается и значение коэффициента теплопередачи конвекцией. В результате рост тепловой проводимости замедляется и в пределе значение тепловой проводимости стремится к некоторому пределу.

Эффективность радиаторов можно увеличить, если увеличивать площадь, участвующую в конвекции, без заметного увеличения площади основания (пластины, на которой установлен теплонагруженный элемент). Таким свойством обладают ребристые, штыревые и игольчатые радиаторы. Ясно, что характер зависимостей теплового сопротивления и тепловой проводимости радиаторов этих видов будет таким же, как плоского радиатора, однако количественные параметры, в частности, предел для зависимости $Y_T(S)$, будут своими для каждого конкретного вида радиатора.

5. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ И ЗАЩИТА ОТ НИХ

5.1. Основные понятия

Телом с сосредоточенной массой называется физическое тело, движения которого могут быть описаны как движения одной точки. Такой точкой является центр масс (Ц.М.). Ясно, что телом с сосредоточенной массой можно считать такие объекты, внутренние элементы которых жестко закреплены.

Степенью свободы называется координата, вдоль которой возможно движение, не зависящее от других движений. У тела с сосредоточенной массой, очевидно, может быть до 6 степеней свободы: 3 — поступательного перемещения и 3 — вращательного (рис. 5.1).

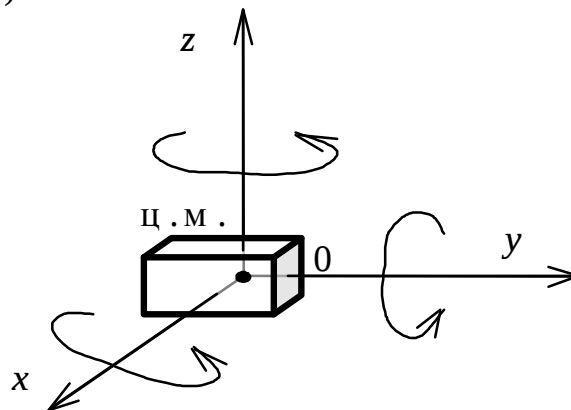


Рис. 5.1 — Степени свободы тела с сосредоточенной массой

5.2. Описание колебаний тела с одной степенью свободы при вязком трении и кинематическом воздействии

Будем считать, что радиоэлектронный блок является телом с сосредоточенной массой и имеет одну степень свободы для поступательных колебаний.

Пусть тело (блок) массой m закреплено через **упругий элемент** на основании массой M . Между телом и основанием имеется также элемент, создающий **вязкое трение**, в котором сила трения возникает только при движении тела относительно основания. Сила вязкого трения пропорциональна скорости относительного перемещения.

Источником независимых поступательных колебаний в системе является основание.

Будем считать, что масса основания M много больше массы тела m , тогда влиянием тела на колебания основания можно пренебречь. Таким образом, рассматривается механическая колебательная система при **кинематическом** воздействии.

Обозначим координату, вдоль которой возможны поступательные колебания, как Z . Поскольку положение тела в покое Z_{00} и положение основания в покое Z_0 не влияют на колебания, будем рассматривать только отклонения точек основания $z_{\text{осн}}(t)$ и центра масс тела $z_0(t)$ от их положений в покое (рис. 5.2).

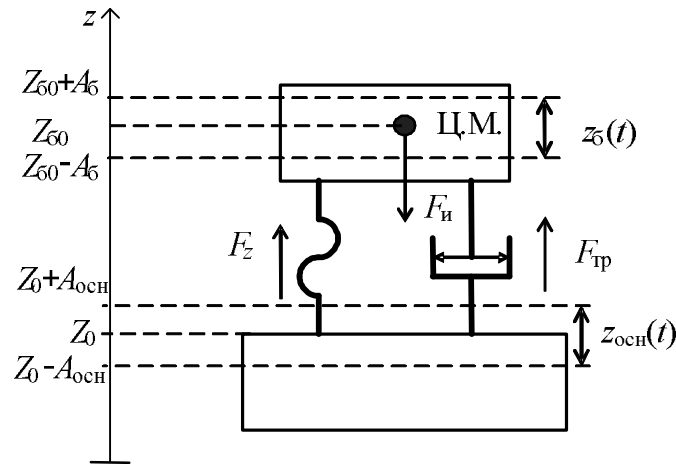


Рис. 5.2 — Схема замещения для анализа поступательных колебаний при кинематическом воздействии

В системе действуют следующие силы:

— динамическая сила упругости $F_y(t)$

$$F_y(t) = k_z [z_{\text{очн}}(t) - z_6(t)],$$

где k_z — коэффициент жесткости, Н/м;

— сила вязкого трения $F_{\text{вт}}(t)$:

$$F_{\text{вт}}(t) = \beta \left(\frac{dz_{\text{очн}}}{dt} - \frac{dz_6}{dt} \right),$$

где β — коэффициент вязкого трения, Н·с/м;

— сила инерции $F_{\text{и}}(t)$:

$$F_{\text{и}}(t) = -m \frac{dz_6^2}{dt^2}.$$

Уравнение колебаний получаем из условия баланса сил

$$F_{\text{и}}(t) + F_y(t) + F_{\text{вт}}(t) = 0.$$

Подставив выражения для действующих сил, получим уравнение (точками обозначено дифференцирование по времени, временной аргумент опущен)

$$m \cdot \ddot{z}_6 + \beta (\dot{z}_6 - \dot{z}_{\text{очн}}) + k_z (z_6 - z_{\text{очн}}) = 0. \quad (5.1)$$

Рассмотрим важнейшие частные случаи.

Случай 1. Свободные колебания в системе без трения. Уравнение (5.1) приобретает вид

$$m \cdot \ddot{z}_6 + k_z z_6 = 0.$$

Его решение хорошо известно: это незатухающие гармонические колебания с собственной частотой ω_0 , амплитуда которых A_6 определяется предысторией возникновения колебаний

$$z_6(t) = A_6 \cos \omega_0 t,$$

где $\omega_0 = \sqrt{k_z/m}$.

Случай 2. Свободные колебания в системе с трением. Уравнение (5.1) запишем в виде

$$\ddot{z}_6 + 2\delta\dot{z}_6 + \omega_0^2 z_6 = 0,$$

где $\delta = \frac{\beta}{2m}$ — величина, называемая **декрементом затухания**.

Решение данного уравнения описывает затухающий переходной процесс

$$z_6(t) = A_6 e^{-\delta t} \cos \omega_1 t,$$

где $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \omega_0 \sqrt{1 - D^2}$.

Введенная величина D называется **коэффициентом демпфирования**:

$$D = \frac{\delta}{\omega_0} = \frac{\beta}{2m\omega_0}.$$

Коэффициент демпфирования характеризует потери энергии, вызванные трением, причем он тем больше, чем больше коэффициент трения. При анализе электрических колебательных систем обычно вводят другую характеристику потерь — **добротность**, которая является обратной величиной от коэффициента демпфирования.

Как известно из электротехники, если величина ω_1 — действительная, то процесс имеет характер затухающих квазигармонических колебаний. Если же ω_1 — мнимая величина, то процесс имеет экспоненциальный характер, без переколебаний. В обоих случаях длительность переходного процесса $t_{\text{пер}}$ примерно равна

$$t_{\text{пер}} \approx 3\delta^{-1} \approx \frac{3}{D\omega_0}. \quad (5.2)$$

Случай 3. Вынужденные колебания при гармоническом воздействии с амплитудой $A_{\text{осн}}$ и частотой $\omega = 2\pi f$

$$z_{\text{осн}}(t) = A_{\text{осн}} \cos \omega t = A_{\text{осн}} \cos 2\pi f t.$$

Решение уравнения (5.1) содержит затухающий переходной процесс с известной длительностью $t_{\text{пер}}$ (5.2) и установившееся решение. Последнее есть гармонические колебания с частотой вынуждающей силы ω и амплитудой A_6 , пропорциональной амплитуде колебаний основания, поэтому можно ввести их отношение

$$\eta_b = \frac{A_6}{A_{\text{осн}}} = \sqrt{\frac{1 + 4D^2 v^2}{(1 - v^2)^2 + 4D^2 v^2}}, \quad (5.3)$$

где $v = \omega/\omega_0 = f/f_0$ — относительная частота.

Величина η_v называется **коэффициентом динамичности** системы.

Полученное выражение (5.3) аналогично амплитудно-частотной характеристике фильтра нижних частот 2-го порядка с одним полюсом.

Добротность такого фильтра равна обратной величине коэффициента демпфирования D .

Семейство кривых, отображающих соотношение (5.3), представлено на рисунке 5.3.

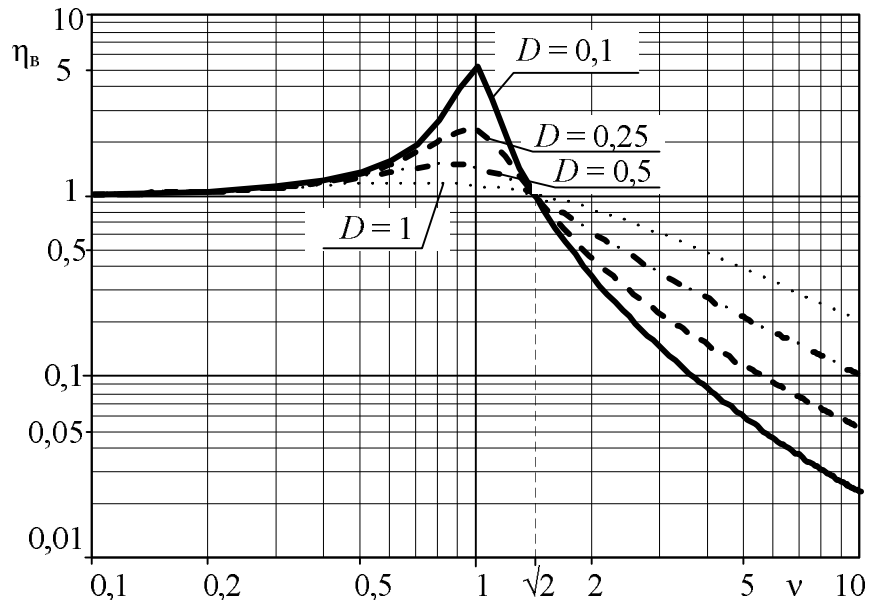


Рис. 5.3 — Зависимость коэффициента динамичности от частоты вибрации

5.3. Обеспечение прочности и устойчивости РЭС при воздействии вибрации

На приведенном графике (см. рис. 5.3) можно выделить три характерные зоны.

Зона 1 по частоте отвечает условию $\omega \ll \omega_0$: собственная (резонансная) частота значительно больше рабочих частот. В этой зоне коэффициент динамичности близок к единице. Высокая резонансная частота соответствует большим значениям коэффициента жесткости, поэтому данную область можно назвать зоной «**жесткой системы**».

Зона 2 называется **резонансной**, так как в ней рабочие частоты лежат вблизи резонансной частоты. Здесь достигаются наибольшие значения коэффициента динамичности, которые зависят от значения коэффициента демпфирования.

Зона 3 является зоной «**мягкой системы**»: рабочие частоты значительно превышают резонансную частоту. Начиная с частоты, равной $\sqrt{2}\omega_0$, достигаются значения $\eta_v < 1$, то есть амплитуда колебаний объекта меньше амплитуды колебаний основания: проявляется эффект **виброзащиты**. Величину η_v для этой зоны принято называть **коэффициентом виброизоляции**.

Основным воздействующим фактором при вибрации является виброускорение. Поскольку ускорение есть вторая производная от перемещения, для синусоидальной вибрации отношение амплитуд перемещения равно отношению амплитуд виброускорений. Таким образом, уменьшение величин действующих на

объект ускорений возможно только в зоне «мягкой системы». Этот эффект достигается только в динамике: «платой» за виброзащиту является наличие резонансной зоны, через которую объект обязательно проходит в процессе разгона и останова колебаний основания (например, при запуске и останове двигателей).

Если допустимое ускорение объекта $a_{\text{доп}}$ меньше ускорений основания $a_{\text{осн}}$, то для реализации виброзащиты применяют специальные изделия — амортизаторы. Они содержат упругие элементы и элементы потерь, которые вводятся, чтобы обеспечить необходимые значения коэффициента демпфирования.

Система амортизации должна обеспечивать устойчивое положение блока, поэтому она содержит не менее трех амортизаторов, но чаще четыре амортизатора и более.

Исходными данными для расчета системы амортизации являются:

- рабочая частота вибрации f или, для несинусоидальной вибрации, частоты гармоник $f_i, i = 1, 2, \dots$;
- амплитуды колебаний основания по каждой гармонике $A_{\text{осн}i}$;
- допустимое ускорение объекта $a_{\text{доп}}$;
- минимальная температура окружающей среды $T_{\text{мин}}$.

Расчет производим в следующем порядке.

Шаг 1. Определяем амплитуды виброускорения основания для характерных частот (для синусоидальной вибрации — одной частоты):

$$a_{\text{осн}i} = (2\pi f_i)^2 A_{\text{осн}i}.$$

Для дальнейшего расчета выбираем одно значение $a_{\text{осн}}$, соответствующее наихудшему случаю.

Шаг 2. Определяем требуемое значение коэффициента виброизоляции η_v

$$\eta_v \leq \frac{a_{\text{доп}}}{a_{\text{осн}}}.$$

Шаг 3. Исходя из условий эксплуатации предварительно выбираем тип амортизатора [3]. Обозначение типа амортизатора определяет его основные конструктивные характеристики, например, АД — «Амортизатор Демпфированный». Выбрать конкретный типоразмер (конкретную строку в справочной таблице), на данном этапе невозможно, так как типоразмер амортизатора определяется пределами допустимых нагрузок.

Наиболее неблагоприятными температурными условиями являются низкие температуры, так как с уменьшением температуры растет коэффициент демпфирования D , в результате чего качество амортизации снижается. Если в справочных данных нет значений D при требуемой температуре, то нужное значение следует определять по имеющимся данным линейной интерполяцией:

$$D = D_1 - \frac{D_1 - D_2}{T_2 - T_1} (T_{\text{мин}} - T_1),$$

где T_1 — низшая, T_2 — высшая допустимые температуры;

D_1, D_2 — справочные значения коэффициентов демпфирования для низшей и высшей допустимых температур соответственно.

Шаг 4. Решаем уравнение (5.3) относительно η_v численно или графически (см. рис. 5.3), используя "наихудшее" для выбранного типа амортизаторов значение D .

Шаг 5. Определяем необходимую собственную частоту f_0 системы амортизации

$$f_0 = \frac{f}{v}.$$

Проверяем, соответствует ли f_0 усредненным паспортным данным. При несоответствии подбираем другой тип амортизатора, заново выполняем шаги 4,5.

Шаг 6. Определяем статическую нагрузку на один амортизатор P .

При полной симметрии расположения амортизаторов относительно центра масс

$$P = \frac{G}{N_a}, \quad (5.4)$$

где $G = mg \approx 10 m$ — вес объекта, N_a — число амортизаторов.

Чаще всего берут четыре амортизатора ($N_a = 4$), но центр масс бывает смещен от центра симметрии на некоторую величину по одной из осей, например, y ; тогда смещение обозначим как Δy (рис. 5.4).

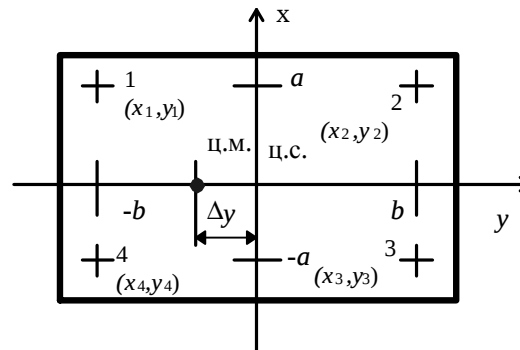


Рис. 5.4 — Расчетная схема расположения амортизаторов

Нагрузки на каждый амортизатор P_j удовлетворяют системе уравнений:

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 + P_3 + P_4 &= G ; \\ P_1 x_1 + P_2 x_2 + P_3 x_3 + P_4 x_4 &= 0 ; \\ P_1 y_1 + P_2 y_2 + P_3 y_3 + P_4 y_4 &= 0 ; \end{aligned} \quad (5.5)$$

где x_j, y_j — координаты точек расположения амортизаторов относительно положения центра масс.

При сохранении частичной симметрии, например, относительно оси y (см. рис. 5.4), то есть при $\Delta x = 0, x_1 = x_2 = a, y_1 = y_2 = -a$, второе уравнение системы (5.5) становится тривиальным. Можно использовать упрощенную систему

$$2 P_I + 2 P_{II} = G ;$$

$$P_I y_I + P_{II} y_{II} = 0 ,$$

где

$$\begin{aligned} P_I &= P_1 = P_4 ; \\ P_{II} &= P_2 = P_3 ; \\ y_I &= y_1 = y_4 = -(b - \Delta y) ; \\ y_{II} &= y_2 = y_3 = b + \Delta y . \end{aligned}$$

В случае составной массы, когда вес корпуса и шасси G_k распределен между амортизаторами равномерно, а центр масс основного тяжелого элемента конструкции весом G_3 смещен, необходимо поступать следующим образом:

— согласно (5.4) распределить вес корпуса G_k по амортизаторам, то есть найти P_{jk} — часть нагрузки на каждый амортизатор, определенная весом корпуса (равные значения);

— согласно (5.5) распределить вес элемента G_3 по амортизаторам — найти P_{j3} (различные значения);

— найти суммарную нагрузку на каждый амортизатор

$$P_j = P_{jk} + P_{j3}.$$

Шаг 7. По справочным данным на выбранный тип амортизатора подбираем конкретные типоразмеры: расчетные нагрузки должны находиться примерно посредине допустимого диапазона.

Шаг 8. Определяем статические прогибы амортизаторов $z_{стj}$:

$$z_{стj} = \frac{P_j}{k_z} ,$$

где k_z — коэффициент жесткости амортизаторов данного типоразмера, Н/мм.

Шаг 9. Определяем собственную частоту системы амортизации f_0 .

Для этого сначала находим собственные частоты для отдельных амортизаторов f_{0j}

$$f_{0j} = 15,75 \sqrt{\frac{1}{z_{стj}}} ,$$

затем в качестве f_0 принимаем среднее арифметическое значение от этих частот.

Шаг 10. Проверяем, обеспечивает ли выбранная система амортизации требуемую виброзащиту. Для этого подставляем найденное значение f_0 в формулу (5.3) или определяем величину по графику (см. рис. 5.3). Если достигнутое значение η_v меньше требуемого или больше требуемого, но не более чем на 25%...30%, то выбор считаем удовлетворительным. В противном случае подбираем иные типоразмеры амортизаторов и повторяем действия шагов 7...10.

Шаг 11. Сравниваем статические прогибы амортизаторов $z_{стj}$: если они различаются более, чем на (0,1...0,2) мм, то вводим в систему амортизации выравнивающие прокладки соответствующей толщины для предотвращения поперечных колебаний.

Возможна такая ситуация, что по справочным данным подобрать выпускаемые промышленностью амортизаторы оказывается невозможно. В этом случае следует, прежде всего, проанализировать происхождение заданного значения до-

пустимого виброускорения $a_{\text{доп}}$. Обычно его определяет допустимое ускорение наименее прочного элемента. Для покупных ЭРИ допустимые ускорения оговариваются в их технических условиях (ТУ), а для элементов конструкции используют либо расчетные, либо экспериментальные данные. Следовательно, на величину $a_{\text{доп}}$ конструктор может влиять, выбрав более прочные элементы или повысив жесткость и прочность несущей конструкции. В самом крайнем случае может понадобиться собственная разработка амортизаторов.

Итак, изделие в целом можно защитить от действия вибрации амортизаторами. Однако для всех элементов внутренней конструкции изделия применить амортизацию невозможно. Остается только применить жесткое закрепление элементов. Оптимальной будет такое закрепление, которое обеспечивает близкие значения собственных частот элементов, значительно превышающие (в 3...5 раз и более) максимальное значение рабочей частоты вибрации.

На основании изложенного, а также с учетом того, что конструкция амортизаторов, как правило, не предотвращает возможность возникновения колебаний по другим степеням свободы, в том числе крутильным, сформулируем основные рекомендации по обеспечению прочности и устойчивости изделия к вибрации:

- а) для элементов внутренней конструкции используют жесткое закрепление;
- б) система амортизации содержит не менее трех амортизаторов;
- в) крепление амортизаторов к корпусу следует выполнять так, чтобы расстояние между плоскостью крепления и центром масс по высоте было минимальным (рис. 5.5а). При серьезной опасности возникновения поперечных и крутильных колебаний следует либо применять направляющие, либо использовать дополнительные амортизаторы (рис. 5.5б);

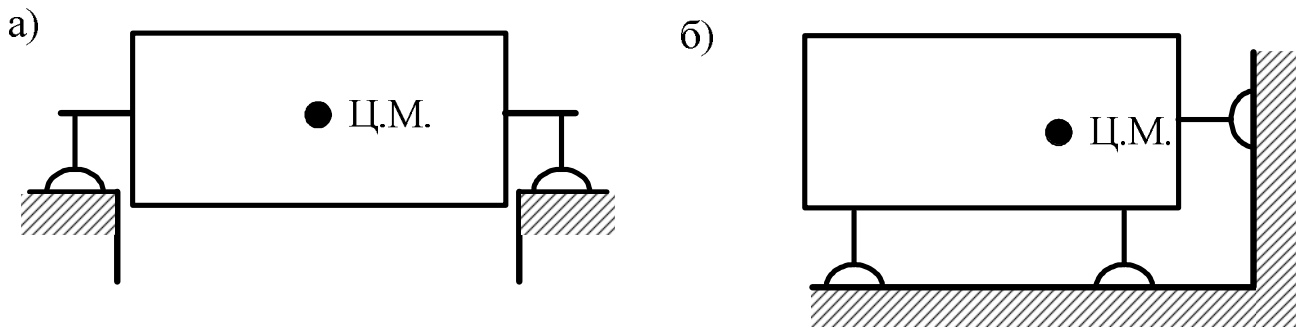


Рис. 5.5 — Рекомендуемые способы крепления амортизаторов

- г) поскольку на любом объекте существуют режимы разгона и остановки механизмов и машин, вызывающих вибрацию, для предотвращения резонансных "выбросов" не следует применять амортизаторы с коэффициентом демпфирования меньше 0,1.

5.4. Особенности защиты от ударов

В отличие от вибрации удары действуют кратковременно, поэтому при жестком закреплении ударное ускорение передается полностью, а при упругом за-

креплении в системе возникают собственные колебания, которые и представляют наибольшую опасность.

Для защиты от ударов можно применять системы амортизации, аналогичные рассмотренным выше. Расчет таких систем довольно сложен. Его можно выполнить, например, основываясь на результатах анализа механической колебательной системы методом интеграла Фурье [4]. Однако на практике систему амортизации чаще всего проектируют для защиты от комбинированного действия вибрации и ударов, при этом основные параметры системы определяют применительно к вибрации. Опасность ударов и собственных колебаний учитывают, выбирая амортизаторы с большими значениями коэффициента демпфирования, чем в случае виброзащиты: не менее 0,2...0,3.

5.5. Защита от механических воздействий других видов

При линейных и центробежных ускорениях, как воздействий длительных и непериодических, динамическая защита невозможна: ускорения непосредственно прикладываются ко всем элементам конструкции. Следовательно, единственным способом обеспечить прочность и устойчивость к этим воздействиям является создание достаточно прочной и жесткой конструкции изделия.

Акустические удары и длительные воздействия представляют собой колебания воздуха, поэтому они передаются элементам конструкции обычно через стенки корпуса в виде вибрации достаточно высоких частот. В результате системы амортизации не требуется, но возрастают требования к жесткости закрепления элементов: их собственные частоты должны быть выше акустических частот. Дополнительно применяют поглотители акустической вибрации в виде обивки материалами с высоким внутренним трением (например, линолеум).

Ветровые нагрузки существенны для изделий типа антенн, которые эксплуатируются на открытом воздухе. Как отмечалось в первой части (см. п. 3.3.2), при скорости ветра V на тело действует полная аэродинамическая сила R

$$R = C_{\alpha} S \frac{\rho V^2}{2},$$

где C_{α} — коэффициент формы (для плоской пластины равен 1);

S — площадь миделевого сечения (в самом широком месте);

ρ — плотность воздуха (у земли при нормальных условиях $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$).

Эта сила приложена к так называемому центру давления (ц.д.) — точке, в которой аэродинамическая сила не создает поворачивающего момента. Для конкретной конструкции можно оценить положение ц.д., например, для осесимметричных тел центр давления будет, очевидно, на оси тела. Зная величину полной аэродинамической силы, можно выработать требования к прочности и жесткости несущей конструкции. Например, если антенна расположена на мачте на высоте H , то при выборе конструкции пятки мачты следует принимать во внимание выворачивающий момент $M_{\text{н}} = H R$. При определении необходимой прочности растяжек следует решить статическую задачу распределения нагрузок известными из физики методами.

6. ПАРАЗИТНЫЕ СВЯЗИ И НАВОДКИ В РЭС

6.1. Основные понятия

Под **паразитной наводкой** принято понимать процесс возникновения и сам паразитный сигнал, который передается из одного РЭС или части РЭС в другую, но не предусмотрен схемой или конструкцией устройства [1].

Механизм передачи паразитного сигнала называют **паразитной связью**.

Задачи исследования паразитных связей и наводок относятся к проблеме **электромагнитной совместимости** радиоэлектронных средств (ЭМС РЭС). При этом различают межсистемную и внутрисистемную (или внутриблочную) ЭМС. Именно обеспечение внутрисистемной, внутриблочной ЭМС относится к задачам конструирования РЭС, так как проблема межсистемной РЭС должна решаться на этапе системного проектирования.

В цепь передачи наводки входят:

- источник наводки ИН;
- паразитная связь ПС;
- приемник наводки ПН.

Различают два основных вида цепей (рис. 6.1): цепь с отдельными элементами и цепь паразитной обратной связи, когда один и тот же функциональный узел по выходу является источником, а по входу — приемником наводки.

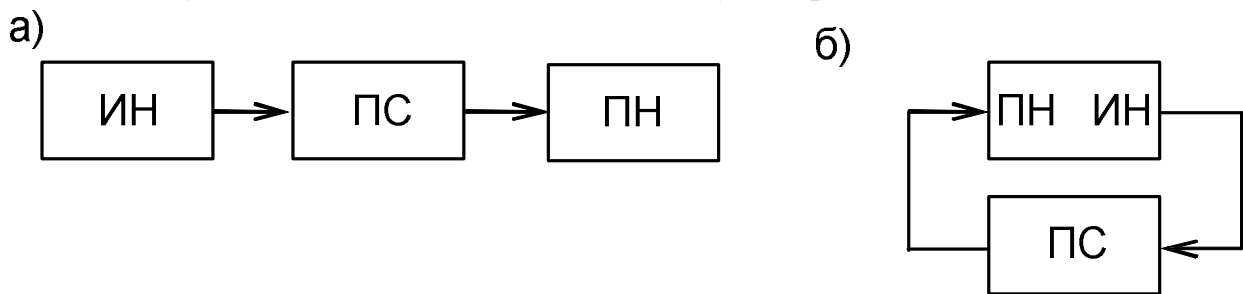


Рис. 6.1 — Структура цепи передачи паразитного сигнала

В задачи конструктора входит:

- прогнозирование ЭМС проектируемого изделия: выявление всех возможных ИН, ПН, ПС и оценка их основных характеристик;
- разработка мероприятий, обеспечивающих ЭМС блоков и узлов изделия путем тщательного исполнения возможных ИН и ПН, а также применение специальных мер подавления ПС.

6.2. Источники и приемники наводок. Виды паразитных связей

Возможными ИН в блоках и функциональных узлах могут быть, например:

- цепи сети питания переменного тока;
- мощные генераторы ВЧ;
- искровые разрядки, электродуговые нагреватели;
- генераторы импульсов;
- выключатели, переключатели, контакты электромагнитных реле;

— феррорезонансные стабилизаторы напряжения;

— выходные и предвыходные каскады усилителей ВЧ, ПЧ, НЧ и импульсов.

Приемниками наводок могут являться все функциональные узлы с низкими уровнями сигналов, а также длинные соединительные провода и кабели.

По полосе занимаемых частот наводки могут быть узкополосными и широкополосными (импульсными или шумоподобными).

Паразитные сигналы могут проявляться:

— как **аддитивная смесь** с полезным сигналом: паразитные сигналы типа шума или фона;

— в виде **паразитной модуляции** высокочастотного сигнала;

— в искажениях **формы частотных характеристик** вплоть до самовозбуждения функциональных узлов при паразитной обратной связи (рис.6.2).

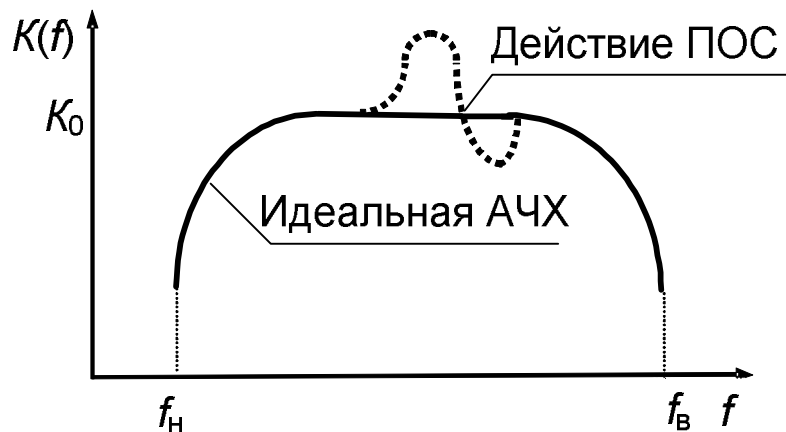


Рис. 6.2 — Влияние паразитной обратной связи (ПОС) на АЧХ усилителей

Рассмотрим классификацию паразитных связей (рис. 6.3).

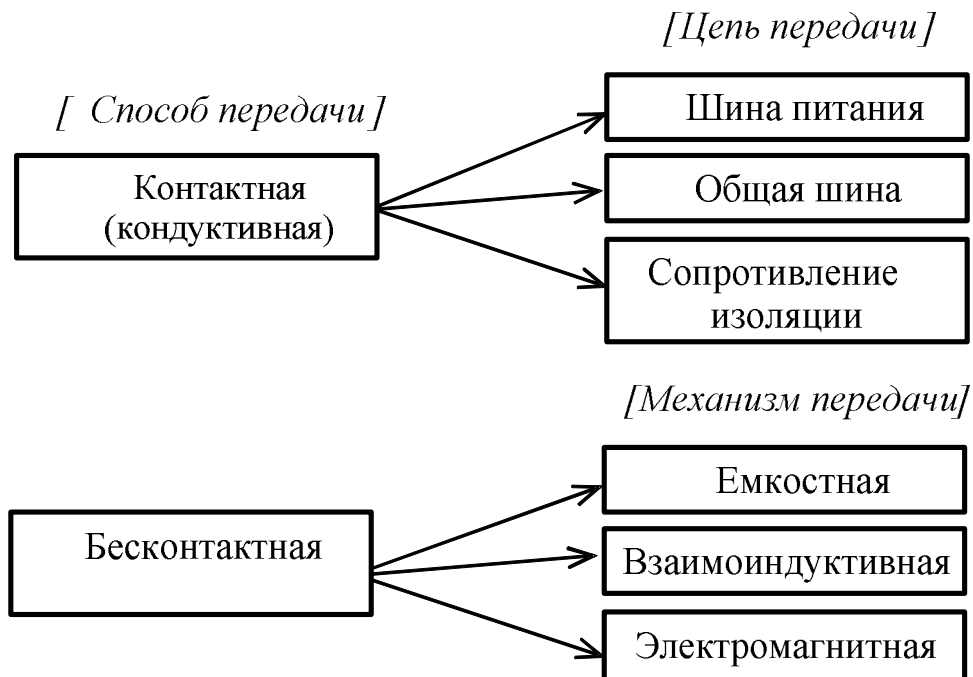
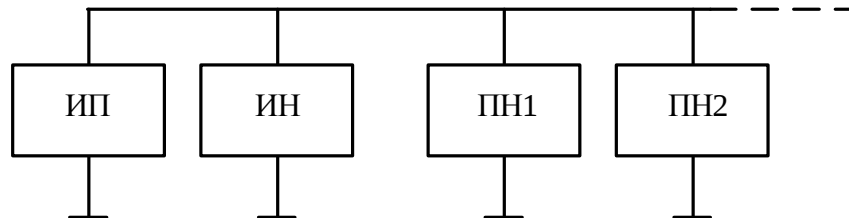


Рис. 6.3 — Классификация паразитных связей

6.3. Анализ паразитных связей

6.3.1. Кондуктивная паразитная связь

Кондуктивная ПС возникает в том случае, когда между ИН и ПН имеются общие цепи протекания тока, а проводники, из которых составлены эти цепи, имеют ненулевое сопротивление. Чаще всего общими являются цепи питания и заземления (рис. 6.4).



ИП — общий источник питания; ИН — источник наводок;
ПН1, ПН2,... — приемники наводок.

Рис. 6.4 — Структурная схема цепи кондуктивной ПС по цепи питания

Анализ кондуктивной ПС выполняют с помощью эквивалентных схем (схем замещения), в которых учитывают все существенные паразитные параметры (рис. 6.5).

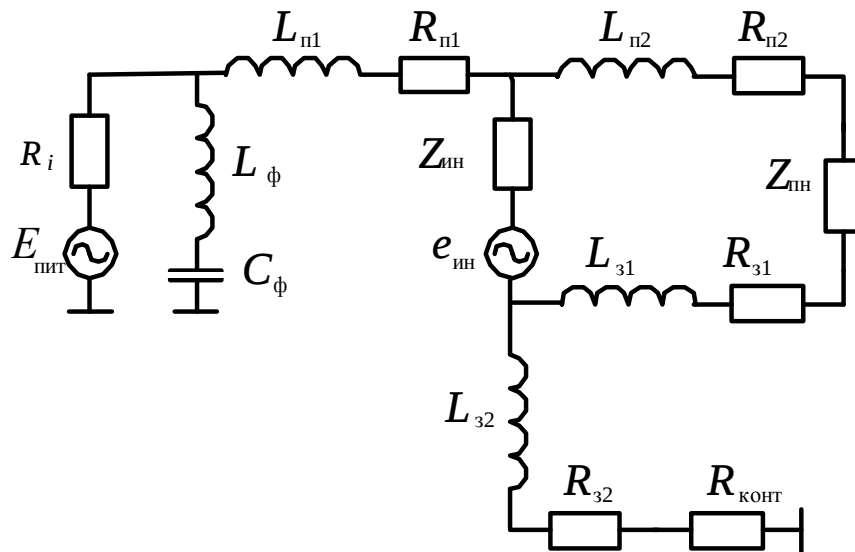


Рис. 6.5 — Возможная эквивалентная схема цепи передачи кондуктивного паразитного сигнала

На схеме обозначены: $E_{\text{пит}}$ — ЭДС источника питания; R_i — внутреннее сопротивление источника питания; C_{ϕ} — емкость фильтра питания; $L_{\text{п1}}$, $L_{\text{п2}}$, $L_{\text{з1}}$, $L_{\text{з2}}$, L_{ϕ} — паразитные индуктивности проводов питания и заземления, а также конденсаторов фильтра питания; $R_{\text{п1}}$, $R_{\text{п2}}$, $R_{\text{з1}}$, $R_{\text{з2}}$ — активные сопротивления проводов питания и заземления; $R_{\text{конт}}$ — контактное сопротивление точки подключения общего провода цепи к общему выводу источника питания; $e_{\text{ин}}$, $Z_{\text{ин}}$ — ЭДС и внутреннее сопротивление источника наводки; $Z_{\text{пн}}$ — сопротивление нагрузки для паразитного сигнала в приемнике наводки.

Другой возможный вид кондуктивной ПС — через сопротивление изоляции между проводниками. Например, поверхностное сопротивление основания печат-

ной платы имеет конечную величину. Ее можно определить, зная значение справочного параметра удельного поверхностного сопротивления $R_{\text{пов}}$, измеряемого в омах на квадрат. Такая единица введена потому, что сопротивление плоского участка изоляции пропорционально его длине, но обратно пропорционально ширине, следовательно, квадратный участок любого размера имеет одинаковое сопротивление.

Для гетинакса $R_{\text{пов}} = 5 \cdot 10^9$ Ом/квadrat, для стеклотекстолита $R_{\text{пов}} = 10^{10}$ Ом/квadrat. При расстоянии между проводниками S и длине области связи $L_{\text{св}}$ на этой длине умещается $L_{\text{св}}/S$ квадратов, значит полное сопротивление изоляции $R_{\text{из}}$ между параллельными проводниками будет равно

$$R_{\text{из}} = R_{\text{пов}} \cdot L_{\text{св}} / S.$$

6.3.2. Емкостная (электростатическая) паразитная связь

Условием возникновения емкостной ПС является наличие **разности потенциалов** между проводником ИН и проводником ПН. Входное сопротивление ПН по паразитному сигналу должно отличаться от нуля.

Физическим механизмом связи является **электростатическая индукция**.

Различают непосредственную емкостную ПС и связь через третий провод (рис. 6.6). На рисунке $C_{\text{пар}}$ — паразитная емкость между проводниками контуров источника и приемника наводки, $C_{\text{пар1}}$, $C_{\text{пар2}}$ — паразитная емкость между проводниками, Z_3 — сопротивление между третьим проводом и общей шиной.

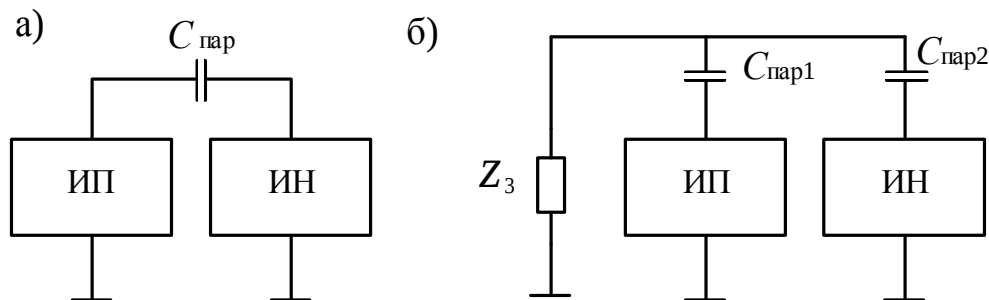


Рис. 6.6 — Структурная схема цепи с непосредственной емкостной паразитной связью (а) и связью через третий провод (б)

Рассмотрим эквивалентную схему непосредственной емкостной связи (рис. 6.7).

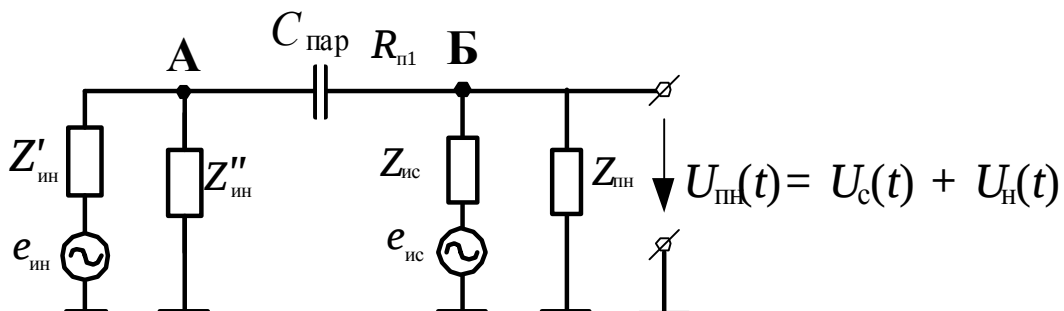


Рис. 6.7 — Эквивалентная схема цепи с непосредственной емкостной ПС

На рисунке обозначены: $e_{\text{ин}}$ — ЭДС источника наводки; $Z_{\text{ин}} Z_{\text{ин}}^*$ — сопротивления контура источника наводки; $C_{\text{пар}}$ — паразитная емкость; $e_{\text{ис}}$, $Z_{\text{ис}}$ — ЭДС и внутреннее сопротивление источника полезного сигнала; $Z_{\text{пн}}$ — входное сопротивление приемника наводки; $U_{\text{пн}}$ — напряжение в характерной точке приемника наводки, складывающееся из напряжения полезного сигнала $U_c(t)$ и напряжения наводки $U_n(t)$.

При анализе этой схемы обычно полагают $Z''_{\text{ин}} \rightarrow \infty$, то есть считают, что в точке А действует ЭДС источника наводки. Кроме того, учитывают относительную малость емкости $C_{\text{пар}}$, пренебрегая протеканием тока от ЭДС сигнала в контуре наводки. Для гармонических сигналов модуль коэффициента передачи паразитного сигнала $K_n(\omega)$ равен

$$K_n(\omega) = \left| \frac{U_n}{E_{\text{ин}}} \right| = \left| \frac{j\omega C_{\text{пар}} Z_{\text{пр}}}{1 + j\omega C_{\text{пар}} Z_{\text{пр}}} \right| \approx \omega Z_{\text{пр}}, \quad (6.1)$$

где $Z_{\text{пр}} = \frac{Z_{\text{пн}} Z_{\text{ис}}}{Z_{\text{ис}} + Z_{\text{пн}}}.$

Для напряжения сигнала U_c с учетом малости паразитной емкости имеем

$$U_c \approx E_{\text{ис}} \frac{Z_{\text{пн}}}{Z_{\text{ис}} + Z_{\text{пн}}}.$$

В эквивалентную схему цепи передачи емкостной наводки через третий провод входят как паразитные емкости $C_{\text{пар}1}$, $C_{\text{пар}2}$, так и сопротивление между третьим проводом и общей шиной Z_3 . Анализ данной цепи также нетрудно провести методами теории цепей.

Практическую трудность представляет выявление данного механизма и оценка $C_{\text{пар}1}$, $C_{\text{пар}2}$, так как третьим проводом может служить либо проводник, не входящий в схему ИН и ПН, либо просто металлический элемент конструкции, не имеющий прямого контакта с корпусом (например, кронштейн или радиатор).

Для оценки паразитных емкостей можно использовать известные эмпирические формулы и графики (см., например, [1,2]), а в более сложных случаях приходится проводить собственные экспериментальные исследования.

6.3.3. Взаимоиндуктивная паразитная связь

Механизмом передачи в этом случае является **электромагнитная индукция**.

Характеристики магнитного поля, возникающего вокруг любого проводника с током, количественно выражаются через его полную индуктивность. Той части магнитного поля, которая проявляется вне проводника, соответствует индуктивность рассеяния L_s . Между двумя проводниками с индуктивностями рассеяния L_{s1} и L_{s2} возникает связь по магнитному полю, которая характеризуется паразитной взаимной индуктивностью $M_{\text{пар}}$:

$$M_{\text{пар}} = k \sqrt{L_{s1} L_{s2}}, \quad (6.2)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от взаимного расположения проводников и расстояния между ними.

По этой причине данный вид связи по магнитному полю называют **взаимоиндуктивной** паразитной связью.

Условиями ее возникновения являются:

- протекание тока в контуре ИН;
- возможность рассеяния магнитного поля, создаваемого этим током;
- возможность восприятия рассеянного магнитного поля проводниками контура ПН;
- возможность протекания тока в контуре ПН.

Анализ количественных характеристик передачи паразитного сигнала можно выполнить на основе эквивалентной схемы (рис. 6.8).

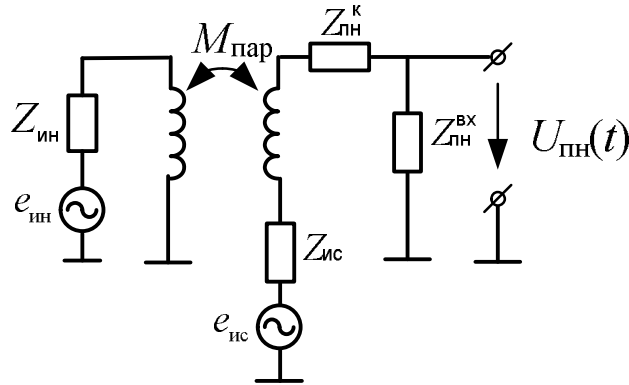


Рис. 6.8 — Эквивалентная схема цепи с взаимоиндуктивной паразитной связью

На рисунке обозначены: $e_{ин}$ — ЭДС источника наводки; $Z_{ин}$ — полное контурное сопротивление цепи ИН (включающее и индуктивность провода, вокруг которого наводится магнитное поле); $M_{пар}$ — паразитная взаимная индуктивность; $e_{ис}$, $Z_{ис}$ — ЭДС и внутреннее сопротивление источника полезного сигнала; $Z_{к_пн}$ — контурное сопротивление цепи между источником полезного сигнала и приемником наводки (активное и индуктивное сопротивление проводов); $Z_{вх_пн}^{вх}$ — входное сопротивление ПН.

В частности, при гармонических сигналах с частотой ω для напряжения наводки будем иметь выражение

$$\mathcal{U}_н = \mathcal{E}_{ин} \frac{j\omega M_{пар} Z_{вх}}{Z_{ин} (Z_{ис} + Z_{к_пн} + Z_{вх})}.$$

Для напряжения сигнала, пренебрегая влиянием контура наводки, получим:

$$\mathcal{U}_с = \mathcal{E}_{ис} \frac{Z_{вх}}{Z_{ис} + Z_{к_пн} + Z_{вх}}.$$

Для сигналов и наводок сложной формы можно оценивать отношение сигнал-помеха по энергетическим спектрам (по мощности) или для выбранных характерных гармоник.

Оценку величины $M_{пар}$ и индуктивности проводников можно выполнить, либо зная индуктивности рассеяния с помощью соотношения (6.2) (например, для трансформаторов и дросселей), либо исходя непосредственно из конфигурации проводников (см., например, [1,2]).

6.3.4. Электромагнитная паразитная связь

В СВЧ цепях излучение возникает на любых неоднородностях линий связи открытого и полукрытого типа (например, двухпроводные и микрополосковые линии, диэлектрические волноводы). Если размеры этих неоднородностей сравнимы с длиной волны, то излучение может быть достаточно эффективным. Однако такие случаи встречаются относительно редко, так как при этом резко ухудшаются условия передачи и обработки сигнала.

Теоретические соотношения для оценки электромагнитной ПС внутри блоков РЭС в литературе отсутствуют. Считается, что данный вид связи устраняется полностью при правильном конструировании СВЧ цепей, в частности, экранов, которые являются практически неотъемлемой частью внутриблочных линий передачи.

6.4. Борьба с паразитными связями и наводками

6.4.1. Классификация мер борьбы

Предлагаемая классификация мер борьбы с паразитными связями и наводками приведена в таблице 6.1.

Таблица 6.1 — Классификация мер борьбы с паразитными связями и наводками

Классификационный параметр	Виды
1) Способ реализации	1.1) схмотехнические; 1.2) конструктивные.
2) Цель применения	2 2.1) пассивные (подавление наводок достигается как побочный эффект); 2 2.2) активные (направленные на подавление наводок).
3) Место применения	3 3.1) в источнике наводки; 3 3.2) в приемнике наводки; 3 3.3) действующие на элементы связи.
4) Характер действия	4.1) направленные на снижение уровня паразитного сигнала или паразитной связи; 4.2) направленные на устранение последствий действия паразитной связи.

6.4.2. Борьба с кондуктивной паразитной связью

К основным мерам борьбы со связью данного вида относятся *фильтрующие* и *развязывающие* цепи. Как правило, это LC-фильтры или RC-фильтры нижних частот, отличающиеся местом включения (рис. 6.9).

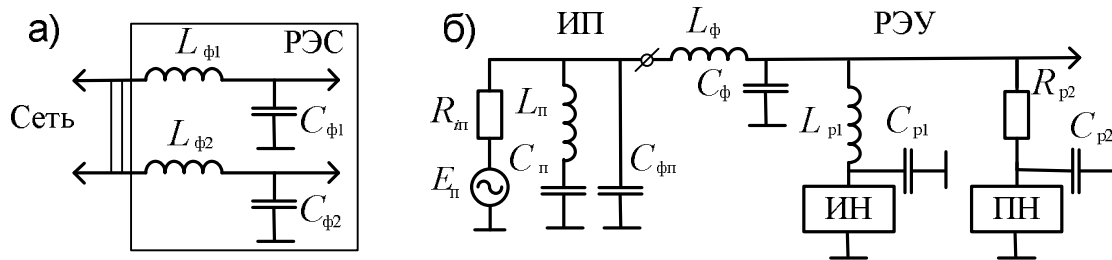


Рис. 6.9 — Примеры использования фильтрующих и развязывающих цепей:

а) сетевой фильтр на индуктивностях $L_{\phi 1}, L_{\phi 2}$ и конденсаторах $C_{\phi 1}, C_{\phi 2}$;

б) фильтрующие и развязывающие цепи в цепи питания РЭС.

На схемах обозначены: E_{π} , R_{π} — ЭДС и внутреннее сопротивление источника питания; C_{π} — ёмкость основного сглаживающего конденсатора источника питания, L_{π} — его паразитная индуктивность; $C_{\phi\pi}$ — емкость дополнительного фильтрующего конденсатора с малой индуктивностью; L_{ϕ} , C_{ϕ} — фильтр шины питания; L_{p1} , C_{p1} , R_{p2} , C_{p2} — элементы развязывающих цепей.

При конструктивном исполнении перечисленных цепей рекомендуется использовать керамические безиндуктивные конденсаторы, в частности, для шин питания могут подойти конденсаторы опорного и проходного типа (рис. 6.10).

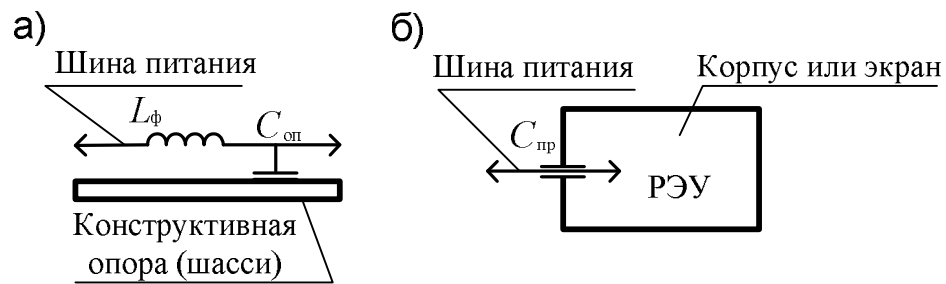


Рис. 6.10 — Примеры рациональной реализации фильтрующих и развязывающих цепей: а) с опорным конденсатором $C_{оп}$; б) с проходным конденсатором $C_{пр}$.

При выборе типов (например, LC -тип или RC -тип), числа звеньев и номиналов фильтрующих и развязывающих цепей можно воспользоваться результатами анализа эквивалентной схемы цепи кондуктивной наводки (см. рис. 6.4). Вначале выбирают самые простые конфигурации цепей, усложняя их лишь по мере необходимости.

Итак, нами рассмотрены фильтрующие и развязывающие цепи. По нашей классификации (см. п. 6.1) эти меры борьбы с кондуктивной ПС относятся к схемотехническим, активным, применяемым во всех элементах цепи передачи наводки, действующим на сам паразитный сигнал.

Вновь подчеркнем ценность классификации мер борьбы с паразитными связями и наводками: можно заметить, что нами рассмотрены не все возможные сочетания классификационных параметров, а значит, имеет смысл поиск других мер борьбы.

Так, например, известно, что индуктивность проводника уменьшается с ростом площади его сечения. Следовательно, для конструктивного исполнения шин питания и заземления можно взять проводники значительно большей толщины

(ширины), чем необходимо для пропускания рабочего тока. В частности, переход от ширины печатного проводника линии питания 0,4 мм к ширине 4,0 мм снижает индуктивность проводника примерно в 2 раза, чем обеспечивается снижение уровня кондуктивного паразитного сигнала на 6 дБ.

6.4.3. Борьба с емкостной паразитной связью

К основным конструктивным, активным мерам борьбы с емкостной ПС относится *электростатическое экранирование*.

Принцип действия экрана основан на том, что в электростатическое поле, создаваемое проводником ИН, вносится дополнительный проводник — экран — так, чтобы он «отвлекал» на себя значительную часть поля, но при этом электрический потенциал экрана был близок к нулю. Это условие достигается путем *короткого замыкания* экрана на общую шину.

Требования к экрану и качеству его соединения с общей шиной можно установить, рассмотрев эквивалентную схему (рис. 6.11), в которую для упрощения рассуждений включена произвольно варьируемая емкость C_3 .

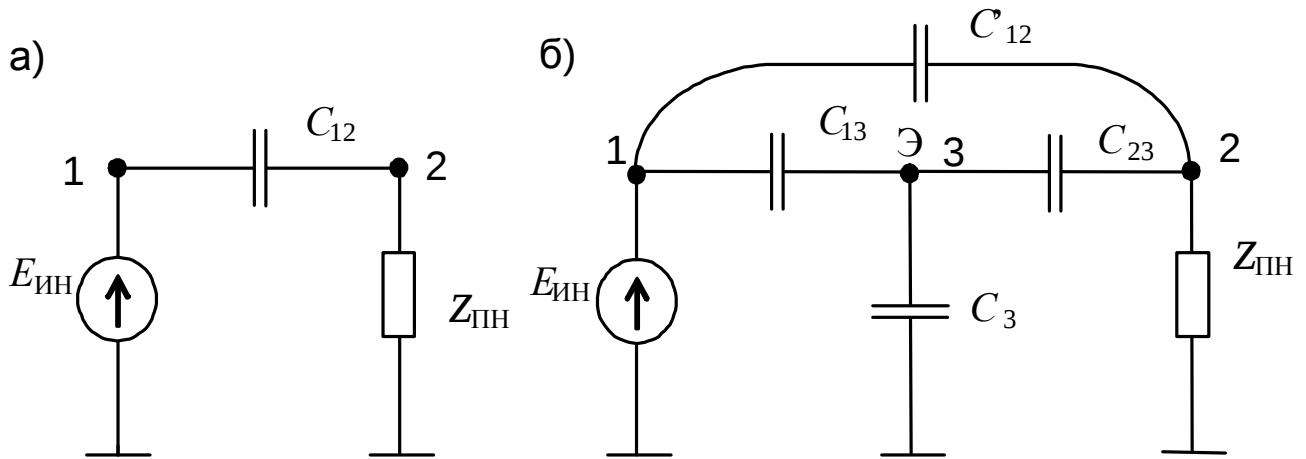


Рис. 6.11 — К пояснению действия электростатического экрана

Пусть C_{12} — паразитная емкость при отсутствии экрана (см. рис. 6.11а). Если экранный проводник 3 помещен между проводниками ИН 1 и ПН 2, то возникают емкости C_{13}, C_{23} (см. рис. 6.11б). Остаточная паразитная емкость непосредственной связи между проводниками 1 и 2 в присутствии экрана C'_{12} будет меньше, чем в первом случае, так как электростатическое поле замыкается теперь не по кратчайшему пути.

Модуль коэффициента передачи наводки без экрана (см. формулу (6.1)) будет равен

$$K_H = \omega C_{12} Z_{ПН}.$$

Коэффициент передачи при наличии экрана $K_{HЭ}$ оценим как сумму коэффициентов передачи по двум параллельным каналам

$$K_{\text{нэ}} = \frac{C_{13}}{C_{13} + C_3} \omega C_{23} Z_{\text{пн}} + \omega C'_{12} Z_{\text{пн}}.$$

Эффективность экранирования оценим как отношение $K_{\text{н}}$ к $K_{\text{нэ}}$:

$$K_{\text{эф}} = \frac{K_{\text{нэ}}}{K_{\text{н}}} \approx \left(\frac{C_{13} C_{23}}{C_{12} (C_{13} + C_3)} + \frac{C'_{12}}{C_{12}} \right)^{-1}. \quad (6.3)$$

Проанализируем теперь полученное соотношение (6.3).

Первый случай. При $C_3 \rightarrow \infty$ (короткое замыкание экрана на корпус) $K_{\text{эф}}$ становится максимальным:

$$K_{\text{эф кз}} = \frac{C_{12}}{C'_{12}}.$$

Физически величина емкости C_{12} определяется перераспределением полной паразитной емкости C_{12} между емкостями C_{13} , C_{23} и C_{12} . Следовательно, должны выполняться условия:

$$C_{13} \gg C_{12}, C_{23} \gg C_{12}, C_{23} \gg C_{12}. \quad (6.4)$$

Из этих соотношений и анализа картины поля следует, что для достижения наибольшего эффекта экранный проводник должен конструктивно располагаться между проводниками 1 и 2, при этом занимая возможно большую часть пространства, в котором действует электростатическое поле.

Второй случай. При $C_3 = 0$ (холостой ход) из (6.3) получим

$$K_{\text{эф хх}} \approx \frac{C_{12}}{C_{23}}.$$

При выполнении соотношений (6.4) эта величина будет меньше единицы, то есть в режиме холостого хода экрана паразитный сигнал оказывается даже больше, чем при отсутствии экрана.

На практике часто применяют радиаторы, не изолированные от коллекторов мощных транзисторов, а значит, соединение их с общей шиной не всегда возможно. Зададимся вопросом: можно ли использовать такой радиатор в качестве экрана, соединив его с общей шиной через конденсатор?

Оказывается, такое соединение вполне возможно, так как характер частотной зависимости сопротивления конденсатора такой же, как у сопротивления паразитных емкостей. При этом емкость конденсатора C_3 должна удовлетворять условию

$$C_3 \geq (10 \dots 20) C_{13}.$$

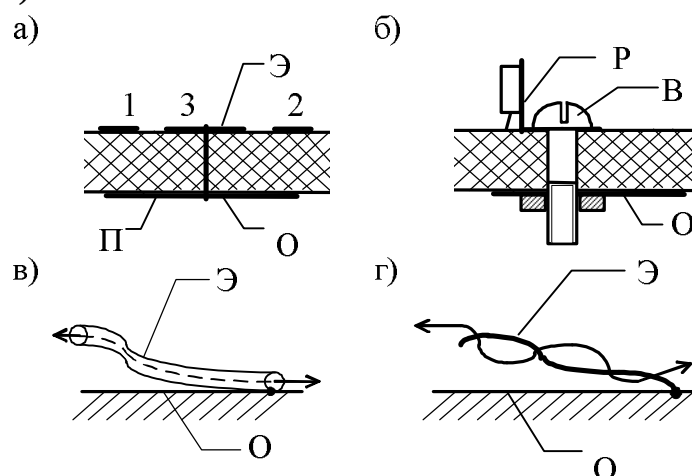
Так как паразитные емкости по порядку величины обычно составляют от единиц до десятков пикофарад, конденсатор с достаточной емкостью будет невелик по размерам и недорог.

В соединении экрана с корпусом не допускается индуктивностей (например, длинных проводов), так как с ростом частоты будет расти модуль сопротивления между экраном и общей шиной, что приведет к снижению эффективности экранирования.

Экран может иметь произвольную форму, но достаточно большую площадь, чтобы «перехватывать» на себя большую часть электрического поля. При этом он не обязательно должен быть сплошным, то есть отверстия, вырезы и т.п. не снижают качества экранирования. Проводимость материала, из которого изготовлен экран, существенной роли не играет: достаточно обеспечить выполнение условий (6.4). Принципиально важную роль играет качество соединения с общей шиной: для достижения хорошего контакта лучше всего непосредственно соединять экранный проводник с общей шиной пайкой, сваркой или надежным резьбовым соединением.

Незаземленные элементы конструкции (например, пластины крепления, радиаторы и т.п.) могут служить дополнительным каналом для паразитных сигналов. Наоборот, «металлизированные», то есть соединенные с корпусом элементы обеспечивают дополнительное экранирование. При этом, если непосредственное соединение невозможно (например, радиатор под напряжением), то допустимо соединять данные элементы с общей шиной через конденсаторы.

В заключение приведем несколько примеров реализации электростатического экрана (рис. 6.12).



Э — экран; О — общая шина; П — перемычка; Р — радиатор; В — винт (болт)

Рис. 6.12 — Примеры электростатических экранов:

- а) печатный проводник, б) «металлизация» радиатора крепежным винтом;
- в) применение экранированного провода; г) дополнительный провод, свитый с сигнальным («витая пара»)

Заметим, что при экранировании проводов соединение с общей шиной в двух точках не дает выигрыша, но из-за такого соединения экрана может возрасти уровень взаимоиндуктивной паразитной связи, так как по экранному проводнику в этом случае может протекать ток, что исключено при соединении в одной точке.

6.4.4. Борьба со взаимоиндуктивной паразитной связью

В данном случае обычно применяют экраны двух видов:

- «вытесняющие» поле из своего объема (магнитоэлектростатические);
- работающие на принципе компенсации наведенного магнитного поля (низкочастотные электромагнитные).

Магнитоэлектростатические экраны выполняют из магнитного материала с большим значением относительной магнитной проницаемости μ в виде замкнутого объема, внутри которого помещается защищаемая цепь (рис.6.13).

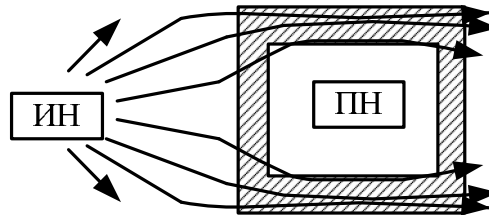


Рис. 6.13 — К пояснению действия магнитоэлектростатического экрана

Материал с высоким значением μ как бы «втягивает» в себя магнитное поле (на рисунке 6.13 показаны силовые линии), в результате внутри полости экрана напряженность магнитного поля снижается. Коэффициент эффективности магнитоэлектростатического экрана $K_{эф}$ как отношение напряжения паразитного сигнала на выходе экранированного ПН к исходному напряжению наводки приблизительно оценивается соотношением [1]:

$$K_{эф} \approx \frac{1}{1 + \mu \cdot d/D},$$

где d — толщина экрана; D — диаметр эквивалентного сферического экрана.

Практически экраны данного типа получаются громоздкими и тяжелыми. Их используют редко, в основном, для экранирования силовых трансформаторов на частотах до 1 кГц.

Электромагнитные низкочастотные экраны работают на принципе компенсации магнитного поля наводки собственным магнитным полем.

Рассмотрим наиболее опасный с точки зрения проявления взаимоиндуктивной паразитной связи случай, когда источник сигнала ИС и приемник сигнала ПС находятся в различных корпусах, которые заземлены (рис.6.14).

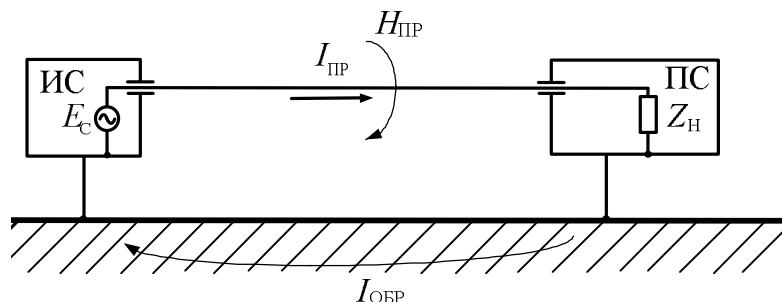


Рис. 6.14 — Передача сигнала между двумя РЭУ по одному проводу

ЭДС источника сигнала E_c связана с нагрузкой Z_n , расположенной в другом корпусе через один провод, а в качестве второго проводника используется защитное заземление. Прямой ток $I_{пр}$ создает вокруг провода магнитное поле $H_{пр}$, которое может служить источником паразитного сигнала. Путь обратного тока $I_{обр}$ пространственно удален от пути прямого тока, и поэтому магнитное поле этого тока не может скомпенсировать магнитное поле прямого тока.

Магнитное поле прямого тока можно полностью скомпенсировать, если обратный ток будет иметь ту же величину и протекать в той же области пространства, что и прямой ток. Очевидно, что полной компенсации технически добиться невозможно, так как проводник для обратного тока нельзя пространственно совместить с проводником для прямого тока. Однако значительно подавить магнитное поле можно, если использовать экранированный провод или скрученную пару проводов. При этом соединение с нагрузкой должно быть таким, чтобы весь обратный ток протекал по экранному проводнику (рис.6.15).

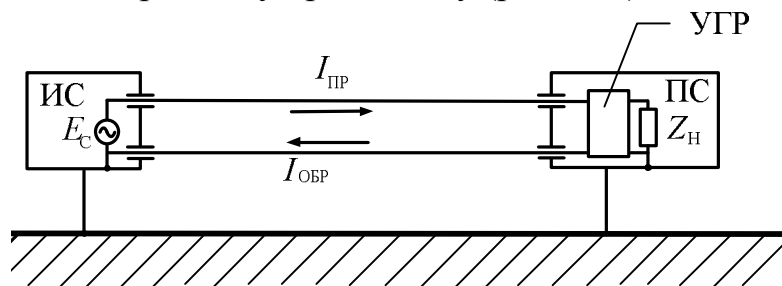


Рис. 6.15 — Обеспечение подавления магнитного поля наводки при передаче сигнала

Практически это можно обеспечить, если нагрузка Z_n источника сигнала E_c , которая расположена внутри корпуса приемника сигнала ПС, не связана гальванически со схемой ПС. Передачу сигнала при этом можно реализовать путем применения специального устройства гальванической развязки УГР, выход которого имеет контакт с общей точкой ПС, а вход — не имеет. В качестве основы для УГР могут служить трансформаторы, оптоэлектронные и акустоэлектронные приборы.

Отметим, что при возникновении случайного контакта между удаленными точками экрана эффективность экранирования резко снижается, так как часть обратного тока пройдет более коротким путем, и «петля» экранированного провода окажется незащищенной.

Таким образом, низкочастотный электромагнитный экран представляет собой проводник, расположенный в непосредственной близости от защищаемого проводника, обеспечивающий замыкание всего обратного тока. Обычно применяют либо оплетку экранированного провода, либо дополнительный провод, скрученный с сигнальным проводом («витая пара»).

Оценить эффективность такого экрана можно только экспериментально.

6.4.5. Борьба с электромагнитной паразитной связью

Как уже отмечалось, электромагнитная паразитная связь может быть существенной в диапазонах МВ, ДМВ, СМВ, где размеры возможных излучателей сравнимы с длиной волны, а корпуса приборов могут создавать условия для волноводного распространения паразитных сигналов. Однако в этих диапазонах для реализации электронных схем используют линии передачи закрытого или полукрытого типа, эффективность излучения из которых низка. Речь, таким образом, может идти о дополнительном экранировании отдельных узлов, представляющих собой значительные неоднородности в тракте (мощные усилительные каскады, катушки индуктивности, контуры и т.п.). В этих случаях применяют высокочастотные электромагнитные экраны, использующие скин-эффект (рис.6.16).

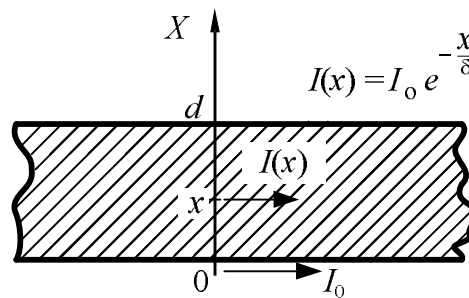


Рис. 6.16 — К пояснению скин-эффекта в проводниках

Скин-эффект состоит в уменьшении плотности тока внутри проводника $I(x)$ по отношению к плотности поверхностного тока I_0 . Проникновение тока вглубь проводника характеризуется величиной δ — глубиной скин-слоя:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}, \quad (6.5)$$

где ω — частота сигнала; μ, μ_0 — относительная и абсолютная магнитные проницаемости проводника; σ — его объемная проводимость.

Так, например, уже на частоте 100 кГц глубина скин-слоя для меди составляет 0,2 мм, а значит, на частотах 1 МГц и выше экран достаточной толщины легко может быть выполнен. Эффективность экрана толщиной d (отношение остаточной напряженности поля внутри экрана к напряженности поля вблизи внешней его поверхности) можно приближенно оценить по отношению плотностей токов на этих поверхностях:

$$K_{\text{ЭФ}} \approx \frac{I(d)}{I_0} = e^{-d/\delta}. \quad (6.6)$$

Из (6.5) и (6.6) видно, что экраны из магнитных материалов, вообще говоря, при одинаковой эффективности могут иметь меньшую толщину, чем экраны из немагнитных проводников. Однако существующие магнитные материалы на высоких частотах обладают значительными омическими потерями (низкой проводи-

мостью σ), что может привести к увеличению общих потерь при передаче сигналов (например, к снижению добротности резонансных систем).

Таким образом, высокочастотные электромагнитные экраны должны выполняться из определенных материалов, иметь достаточную толщину стенок и окружать весь защищаемый объем. Малые отверстия и щели, расположенные вдоль линий поверхностного тока, допустимы. Поперечные щели и крышки, не имеющие надежного контакта с экранирующим кожухом во многих точках, резко снижают эффективность экранирования.

6.4.6. Схемотехнические меры борьбы с наводками различных типов

К широко применяемым мерам борьбы, обеспечивающим подавление наводок различного типа относятся согласованная передача сигнала и применение симметричных сигналов.

Рассмотрим условия передачи мощности сигнала от источника с ЭДС E и внутренним сопротивлением R_i к нагрузке Z_n . Положим для простоты, что нагрузка — чисто активная: $Z_n = R_n$. Ток в нагрузке I_n и напряжение на ней U_n найдем по закону Ома

$$I_n = \frac{E}{R_i + R_n}; \quad U_n = \frac{E \cdot R_n}{R_i + R_n}.$$

Мощность, выделяемая в нагрузке, равна

$$P_n = \frac{E^2 \cdot R_n}{(R_i + R_n)^2}.$$

Зависимость этой мощности от сопротивления нагрузки имеет следующий вид (рис. 6.17).

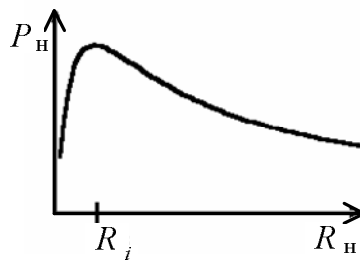


Рис. 6.17 — Зависимость мощности в нагрузке от сопротивления нагрузки

Видно, что выделяемая мощность имеет максимум при $R_i = R_n$. Нетрудно убедиться, что при любом ненулевом значении реактивной составляющей нагрузки значение максимальной мощности будет меньше, чем при активной нагрузке. Таким образом, режим *согласованной передачи*, когда нагрузка чисто активна и равна внутреннему сопротивлению источника, соответствует максимальной передаче мощности нагрузке.

При емкостной паразитной связи внутреннее сопротивление источника велико, так как обычно паразитные емкости сравнительно малы. Следовательно, при оптимальной для основного сигнала нагрузке передача мощности от источника емкостного паразитного сигнала характеризуется начальным участком зависимости, изображенной на рисунке 6.17.

При взаимоиндуктивной паразитной связи паразитного сигнала внутреннее сопротивление источника паразитного сигнала, наоборот, мало, и передача мощности соответствует большим значениям сопротивления нагрузки.

Таким образом, при согласованной передаче сигнала эффективно подавляются как емкостные, так и взаимоиндуктивные наводки.

Идея метода **симметризации** сигналов состоит в следующем (рис. 6.18).

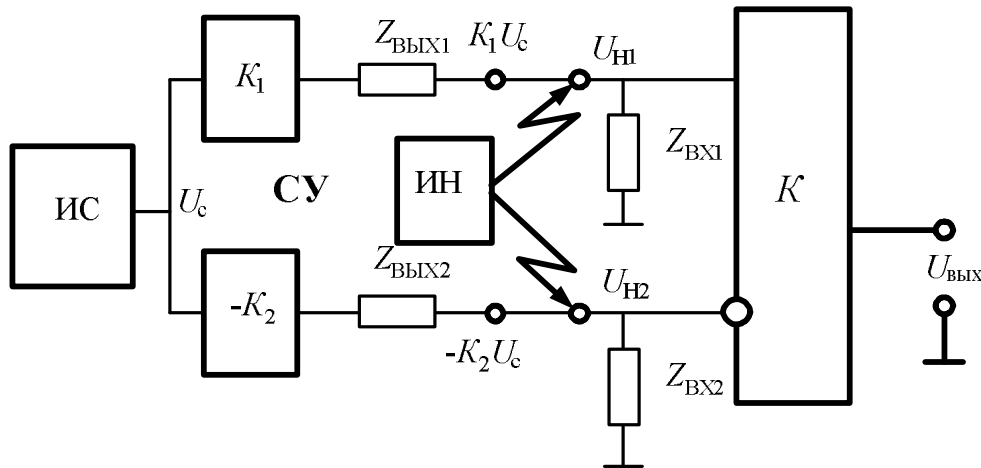


Рис. 6.18 — Эквивалентная схема цепи передачи симметричных сигналов

Полезный сигнал напряжением U_c с выхода источника сигнала ИС поступает на симметрирующее устройство СУ, которое имеет два выхода. Коэффициент передачи СУ со входа на первый выход равен K_1 , а на второй выход равен $-K_2$. Выходы СУ соединены с двумя линиями, по которым передаются полезные сигналы. Ясно, что при $K_1 = K_2$ потенциалы линий по полезному сигналу относительно общей шины будут равны по модулю, но сигналы противоположны по фазе. Концы линий с симметричными полезными сигналами подключаются к вычитающему устройству — дифференциальному усилителю ДУ с коэффициентами передачи $+K$ и $-K$ по соответствующим входам. В результате полезный сигнал на выходе ДУ $U_{c.вых}$ будет равен

$$U_{c.вых} = K K_1 U_c - K (-K_2) U_c = K (K_1 + K_2) U_c.$$

Паразитные сигналы с источника наводки ИН попадают через паразитную связь на сигнальные линии. При этом, так как паразитные сигналы не проходят через СУ, напряжения наводки на первой и второй линиях $-U_{H1}$ и U_{H2} будут синфазными. Паразитный сигнал на выходе ДУ $U_{н.вых}$ равен

$$U_{н.вых} = K U_{H1} - K U_{H2} = K (U_{H1} - U_{H2}).$$

Коэффициент ослабления наводки можно оценить, сравнивая $U_{н.вых}$ с величиной, которую можно получить на выходе при подключенной одной линии, например, первой:

$$K_{\text{осл.н}} = \frac{K \cdot U_{\text{н1}}}{K(U_{\text{н1}} - U_{\text{н2}})} = \frac{U_{\text{н1}}}{U_{\text{н1}} - U_{\text{н2}}}.$$

Видно, что при $U_{\text{н1}} = U_{\text{н2}}$ ослабление стремится к бесконечности, то есть наводка полностью подавляется. Близость значений $U_{\text{н1}}$ и $U_{\text{н2}}$ можно обеспечить, применяя специальные конструктивные решения сигнальных линий (например, прокладывая печатные проводники параллельно по двум сторонам платы), а также специальные схемотехнические решения (в частности, выбирая схемы, обеспечивающие близкие значения выходных сопротивлений СУ $Z_{\text{вых1}}$, $Z_{\text{вых2}}$ и входные сопротивления дифференциального усилителя $Z_{\text{вх1}}$, $Z_{\text{вх2}}$).

Таким образом, путем усложнения схемы передачи полезного сигнала при специальном выборе параметров элементов этой схемы и соответствующем выборе конструктивных решений можно обеспечить эффективное подавление наводок любого типа.

6.4.7. Общие рекомендации

Так как проблема обеспечения межсистемной и внутриблочной электромагнитной совместимости является весьма сложной, борьба с паразитными связями и наводками должна быть комплексной: меры борьбы должны применяться во всех возможных источниках и приемниках наводок. Особое внимание должно быть уделено путям прохождения паразитных сигналов.

Применение активных мер борьбы связано, как правило, со значительными издержками: увеличением массы и габаритов, повышением материалоемкости, дополнительными искажениями полезных сигналов и т.п. По этой причине следует пытаться найти такой вариант конструктивного исполнения изделия, в котором достигается подавление паразитных сигналов без экранирования, без существенной переработки схемы и других мер.

ЧАСТЬ 3. НАДЕЖНОСТЬ ПО ВНЕЗАПНЫМ ОТКАЗАМ И ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

7. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Все соотношения теории надежности базируются на первичных показателях надежности, которые могут быть определены только экспериментально. Такие экспериментальные исследования проводят производители электрорадиоизделий (ЭРИ), иногда — производители сложных РЭС.

Эксперимент ставится следующим образом.

Берется $N \gg 1$ заведомо исправных изделий и все они одновременно включаются в работу в номинальном режиме при нормальных внешних условиях (иногда для ускорения испытаний применяют ужесточенные режимы, но тогда результаты соответственно пересчитывают). Фиксируют моменты наступления отказов и число отказавших изделий, пока все изделия не выйдут из строя. Таким путем появляется информация о числе вышедших из строя изделий нарастающим итогом на текущий момент времени $n(t)$. Число изделий, оставшихся работоспособными $n_{\text{раб}}(t)$, очевидно, равно разности между первоначальным количеством изделий и числом вышедших из строя к моменту t : $n_{\text{раб}}(t) = N - n(t)$.

Для наглядности обе зависимости представляют графически, считая изменение числа изделий непрерывным (рис. 7.1).

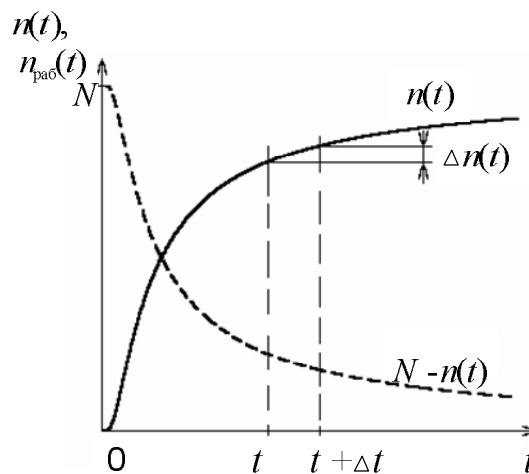


Рис. 7.1 — Примерный вид зависимостей, характеризующих результаты испытаний на надежность

В каждый момент времени имеем определенное число исходов случайного эксперимента. По определению понятия «вероятность случайного события» **вероятность отказов** $Q(t)$ равна отношению числа событий «отказ» к общему числу возможных исходов

$$Q(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n(t)}{N} \approx \frac{n(t)}{N}. \quad (7.1)$$

Аналогично вводится **вероятность безотказной работы** $P(t)$

$$P(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_{\text{раб}}(t)}{N} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N - n(t)}{N} \approx \frac{N - n(t)}{N}. \quad (7.2)$$

Поскольку в рассматриваемом эксперименте других исходов быть не может, эти две вероятности удовлетворяют условию полноты

$$Q(t) + P(t) = 1; \quad Q(t) = 1 - P(t).$$

Момент наступления очередного отказа t можно считать непрерывной случайной величиной, связанной с исходами случайного эксперимента. Тогда $Q(t)$ является интегральным законом распределения времени наработки до отказа, а $P(t)$ — интегральным законом распределения времени безотказной работы. Формально можно ввести и дифференциальные законы распределения этих случайных величин — соответственно $q(t)$ и $p(t)$

$$q(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \approx \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot N}; \quad p(t) = \frac{dP(t)}{dt} \approx -\frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot N}. \quad (7.3)$$

Видно, что эти два закона количественно отличаются только знаком. На практике использовать дифференциальные законы неудобно, так как значения $q(t)$ и $p(t)$ зависят от исходного числа изделий. Эту зависимость можно устранить, если дифференциальные законы вводить не по отношению к исходному числу элементов, а к числу элементов, оставшихся работоспособными к моменту времени t . Полученный дифференциальный закон носит название **«интенсивность отказов»** $\lambda(t)$

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta n(t)}{\Delta t [N - n(t)]}. \quad (7.4)$$

Получим соотношения, связывающие $\lambda(t)$ с интегральными характеристиками. Сравнив (7.4) и (7.3), видим, что в числителе правой части (7.4) не хватает величины N , поэтому умножим и разделим на правую часть на эту величину. Перегруппировав сомножители, получим

$$\lambda(t) \approx \frac{\Delta n(t)}{\Delta t [N - n(t)]} \cdot \frac{N}{N} \approx \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot N} \cdot \frac{N}{[N - n(t)]} = -\frac{p(t)}{P(t)} = \frac{q(t)}{P(t)}.$$

Поскольку $p(t)$ — дифференциальный закон, то есть результат дифференцирования интегрального закона, можем теперь получить дифференциальное уравнение

$$\lambda(t) = - \frac{\frac{dP(t)}{dt}}{P(t)};$$

$$\lambda(t) = - \frac{d[\ln P(t)]}{dt}.$$

Домножив обе части на dt и произведя интегрирование, получим

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) dt \right]. \quad (7.5)$$

Если интенсивность отказов не зависит от времени, то (7.5) упрощается и приобретает вид экспоненциального закона

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (7.6)$$

8. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ И СРЕДНЕЕ ВРЕМЯ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ

8.1. Зависимость интенсивности отказов элементов от времени наработки

На основе многолетних наблюдений установлено, что зависимость интенсивности отказов большинства ЭРИ имеет три характерные зоны (рис. 8.1).

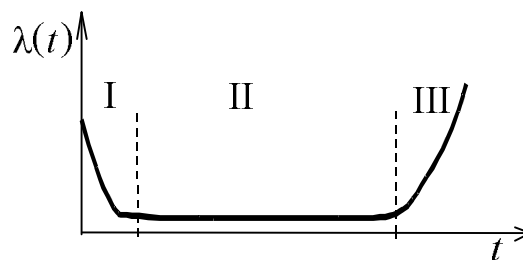


Рис. 8.1 — Характерный вид зависимости интенсивности отказов элементов от времени наработки

На начальном участке кривой (участок I) интенсивность отказов повышена из-за наличия скрытых дефектов, избежать которых при изготовлении элементов не всегда удастся. Эти дефекты выявляются довольно быстро, примерно за 30...100 часов наработки. Принято называть участок I периодом **приработки**.

Из-за выбывания изделий со скрытыми дефектами интенсивность отказов снижается и на участке II становится приблизительно постоянной. Данный участок характеризует период **основной эксплуатации** изделия, продолжительность которого соответствует расчетному ресурсу изделия. В зависимости от вида ЭРИ и, соответственно, физико-химических процессов, приводящих к исчерпанию ресурса, длительность периода основной эксплуатации может составлять $10^3 \dots 10^5$ часов и более.

Участок III рассматриваемой кривой, на котором интенсивность отказов резко повышается, характеризуется исчерпанием ресурса работоспособности, поэтому называется периодом **износных отказов**.

8.2. Зависимость интенсивности отказов элементов от электрического режима, теплового режима и других факторов условий эксплуатации

При работе ЭРИ в электрических цепях они оказываются под некоторой электрической нагрузкой. Очевидно, что при значительном превышении электрической нагрузки сверх расчетной элемент может выйти из строя.

Для оценки степени нагруженности электрического режима применяют **коэффициенты нагрузки** k_n

$$k_n = \frac{z_{\text{ном}}}{z},$$

где $z_{\text{ном}}$ — номинальное значение, а z — рабочее значение нагрузочного параметра.

Некоторые ЭРИ имеют один нагрузочный параметр (например, мощность рассеяния для резисторов), другие — два и более (например, степень нагруженности режима транзисторов характеризуется током, напряжением и мощностью рассеяния).

Кроме электрического режима, важнейшим фактором, определяющим надежность элемента, является его тепловой режим, так как степень нагрева элемента значительно влияет на скорость происходящих в нем физико-химических деградиционных процессов (рис. 8.2).

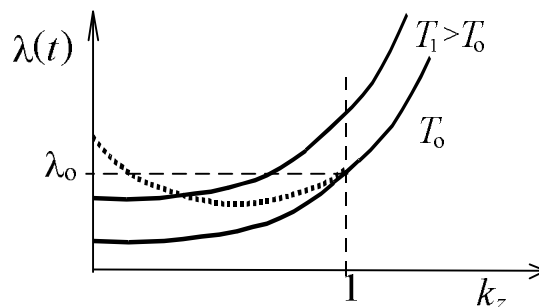


Рис. 8.2 — Характерный вид зависимости интенсивности отказов элементов от электрического и теплового режимов

Номинальное значение интенсивности отказов λ_0 , которое приводится в справочной литературе, соответствует номинальной нагрузке (единичному значению коэффициента нагрузки z) и нормальной температуре $T_0 = 293$ К. С ростом температуры интенсивность отказов, как правило, возрастает. При снижении нагруженности электрического режима надежность возрастает. Важно отметить, что при полном снятии нагрузки, когда изделие не работает, его ресурс все равно расходуется: интенсивность отказов не становится равной нулю. Для некоторых видов ЭРИ, например, сверхбольших интегральных микросхем, ресурс быстрее расходуется в выключенном состоянии, чем в рабочем (пунктирная линия на рис. 8.2.).

Для количественного учета влияния электрического и теплового режима обычно вводят поправочный множитель $a(z, T)$. Таблицы этой функции двух переменных приводятся в справочной литературе (см., например, [5]).

Остальные факторы, которые определяются условиями эксплуатации изделия, в той или иной мере также влияют на надежность. Их действие учитывают путем введения дополнительных коэффициентов, значения которых можно найти в справочниках.

Таким образом, выражение для расчета уточненного значения интенсивности отказов λ с учетом основных действующих факторов приобретает вид

$$\lambda = a(z, T)k_1k_2k_3k_4\lambda_0,$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 — поправочные коэффициенты, с помощью которых учитывают действие вибрации, ударов, повышенной влажности, пониженного атмосферного давления.

8.3. Среднее время безотказной работы

Как было отмечено выше, в большой партии однотипных ЭРИ имеются элементы с разным индивидуальным ресурсом. Для оценки усредненного показателя вводятся в рассмотрение *идеальные по надежности* элементы — такие изделия, которые работают без отказа до момента исчерпания ресурса, а затем все одновременно отказывают. Для идеальных по надежности элементов зависимость вероятности безотказной работы от времени имеет вид прямоугольника (рис. 8.3).

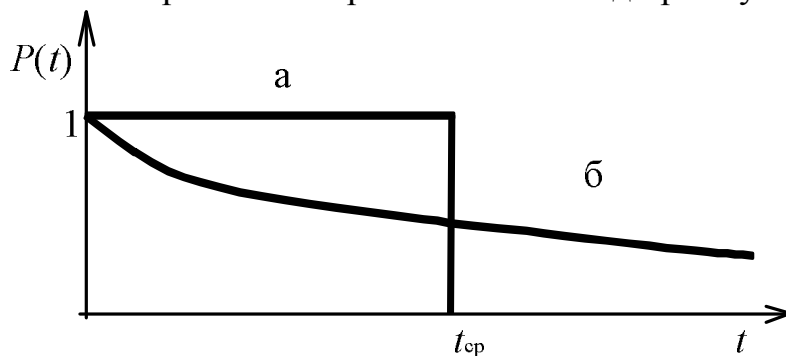


Рис. 8.3 — Зависимости вероятности безотказной работы для идеальных по надежности (а) и реальных (б) элементов

Партии из N реальных элементов можно поставить в соответствие такую же по объему партию идеальных элементов с тем же значением полного ресурса наработки. Это означает, что площадь под кривой $P(t)$ должна быть равна площади прямоугольника с единичной высотой. Ширина такого прямоугольника для идеальных элементов будет равна его ресурсу, а для реальных элементов — *среднему времени безотказной работы* $t_{ср}$. Приведенное рассуждение соответствует следующему выражению

$$t_{ср} = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (8.1)$$

Выразив вероятность безотказной работы через интенсивность отказов с помощью соотношения (7.5), получим

$$t_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau} dt \quad (8.2)$$

Для основного периода эксплуатации, как было отмечено в п. 8.1, интенсивность отказов постоянна, поэтому справедлива формула (7.6) и будем иметь

$$t_{\text{cp}} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = -\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda}. \quad (8.3)$$

Заметим, что вероятность безотказной работы для наработки, равной среднему времени безотказной работы, равна

$$P(t_{\text{cp}}) = e^{-\lambda t_{\text{cp}}} = e^{-\frac{\lambda}{\lambda}} = e^{-1} \approx 0,3.$$

Таким образом, большая часть элементов откажет до наступления среднего времени безотказной работы: к значению t_{cp} следует относиться как к расчетной величине, в какой-то мере характеризующей надежность. На практике граничное значение времени наработки $t_{\text{гр}}$ обычно оценивают из условия достижения достаточно большого граничного значения вероятности безотказной работы $P_{\text{гр}}$

$$P_{\text{гр}} = e^{-\lambda t_{\text{гр}}}; \quad P_{\text{гр}} \approx 1 - \lambda t_{\text{гр}}; \quad t_{\text{гр}} \approx \frac{1}{\lambda} (1 - P_{\text{гр}}) \approx t_{\text{cp}} (1 - P_{\text{гр}}).$$

Например, для граничной вероятности, равной 0,9, граничное время наработки будет примерно в 10 раз меньше среднего.

9. ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНОГО ИЗДЕЛИЯ

9.1. Показатели надежности однофункционального изделия без резервирования

Для того, чтобы определить показатели надежности изделия, состоящего из n элементов, необходимо знать, по крайней мере, вероятности безотказной работы элементов p_i и характер влияния отказа каждого элемента на надежность изделия. Затем составляется *логически эквивалентная схема* (ЛЭС) устройства: условные изображения элементов соединяются линиями связи так, чтобы отказ одного элемента соответствовал разрыву связи через этот элемент.

Случай однофункционального нерезервированного изделия является простейшим: поскольку отказ одного элемента приводит к отказу всего изделия ЛЭС получается последовательной (рис. 9.1).

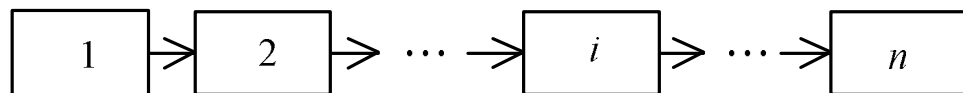


Рис. 9.1 — ЛЭС однофункционального нерезервированного изделия

Из данной ЛЭС видно, что случайное событие «отказ изделия» произойдет, если откажет первый элемент **ИЛИ** второй элемент и т.д. При такой логической связи вывести формулу для вероятности безотказной работы изделия довольно сложно.

Событие «безотказная работа изделия» наступает, когда работоспособен первый элемент **И** второй элемент и т.д. Логика «И» при независимых событиях соответствует перемножению вероятностей, поэтому для вероятности безотказной работы изделия P и для вероятности отказа Q будем иметь

$$P = \prod_{i=1}^n p_i; \quad Q = 1 - P = 1 - \prod_{i=1}^n p_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i),$$

где q_i — вероятность отказа i -го элемента.

Подчеркнем, что данные формулы справедливы, если отказы независимы: случай вынужденных отказов требует отдельного рассмотрения.

Принимая во внимание выражение (1.6), получим

$$P = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-\sum \lambda_i t}, \quad (9.1)$$

где λ_i — интенсивность отказов i -го элемента.

Таким образом, если ввести в рассмотрение интенсивность отказов изделия Λ , то для основного этапа эксплуатации эту величину можно найти по формуле

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \sum_{j=1}^m n_j \lambda_j. \quad (9.2)$$

Последний вариант формулы соответствует наиболее часто встречающемуся на практике случаю, когда изделие состоит из m групп по n_j ($j = 1, 2, \dots, m$) однотипных элементов.

Из полученных соотношений следует, что если отказ одного элемента приводит к отказу всего изделия, то при усложнении изделия (увеличении числа элементов) его надежность снижается.

9.2. Оценка надежности многофункционального изделия без резервирования

Как правило, радиотехническое изделие выполняет несколько различных функций. При этом часть его элементов работает при реализации любой функции, а остальные группы элементов обеспечивают выполнение только своей функции. Ясно, что общая часть и элементы, относящиеся к каждой функции, объединяются по последовательным ЛЭС (см. рис. 9.1), а в ЛЭС всего изделия цепочки, относящиеся к отдельным функциям, параллельны (рис. 9.2).

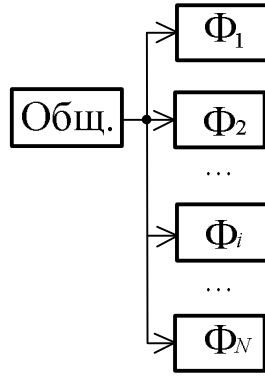


Рис. 9.2 — Укрупненная ЛЭС многофункционального изделия

Из схемы следует, что вероятность безотказной работы по каждой функции P_i можно найти как для последовательной схемы

$$P_i = P_{\text{общ}} P_{\Phi i},$$

где $P_{\text{общ}}$ — вероятность безотказной работы общей части изделия;

$P_{\Phi i}$ — вероятность безотказной работы групп элементов, относящихся к i -й функции.

В свою очередь, значения $P_{\text{общ}}$ и $P_{\Phi i}$ можно найти по формуле (9.1).

Таким образом, на основе ЛЭС можно оценить показатели надежности по каждой функции многофункционального изделия в отдельности. Если функции по важности неравнозначны, то можно говорить о частичной работоспособности или о работоспособности по важнейшим функциям.

9.3. Оценка надежности изделия с общим и поэлементным резервированием

Резервированием называется такое подключение дополнительных элементов, при котором выход из строя одного или нескольких элементов не приводит к отказу изделия в целом. Предположим, что по m таких элементов подключено к основным элементам: случай **m -кратного** поэлементного резервирования. ЛЭС такого изделия содержит параллельные соединения (рис. 9.3).

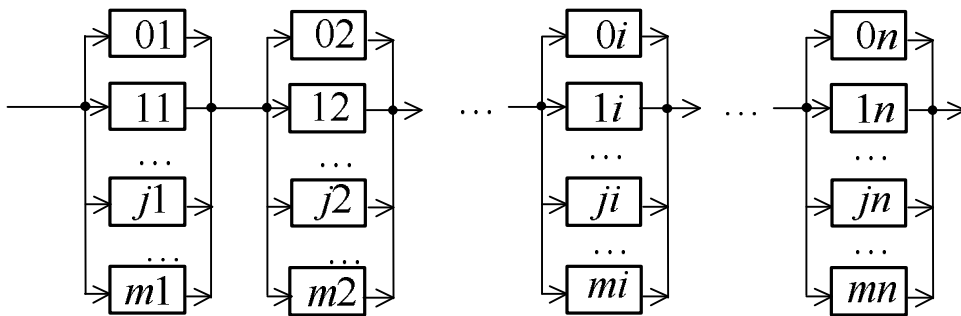


Рис. 9.3 — ЛЭС изделия с поэлементным резервированием

Первый индекс здесь указывает номер цепи (основная цепь имеет нулевой номер), второй — номер элемента.

Отказ i -го элемента произойдет, если откажет основной элемент **И** первый резервный, **И** второй резервный и т.д. Следовательно, вероятность отказа резер-

вированного элемента q_i можно найти, перемножая вероятности отказов основного и резервных элементов q_{ji}

$$q_i = \prod_{j=0}^m q_{ji}.$$

Мы, фактически, теперь заменяем каждый элемент с резервными цепями одним и переходим к последовательной ЛЭС (см. рис. 9.1). Для вероятности безотказной работы имеем формулу (9.1), которая позволяет получить окончательные соотношения

$$P = \prod_{i=1}^n p_i = \prod_{i=1}^n (1 - q_i) = \prod_{i=1}^n (1 - \prod_{j=0}^m q_{ji}) = \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{j=0}^m (1 - p_{ji}) \right]; \quad (9.2)$$

$$Q = 1 - P = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \prod_{j=0}^m q_{ji}). \quad (9.3)$$

Рассмотрим теперь случай m -кратного общего резервирования, когда резервируется вся цепь из n элементов. Чаще всего для подключения резервных цепей приходится использовать дополнительные коммутирующие элементы, которые на ЛЭС отображаются одним элементом, включенными последовательно. Резервные цепи параллельны основной цепи (рис. 9.4).

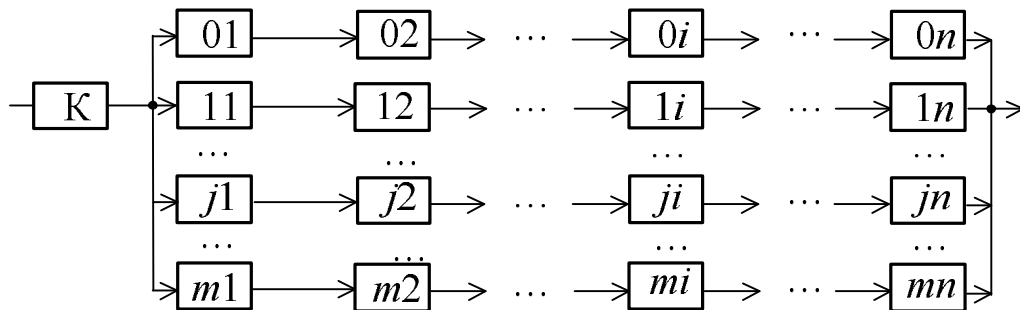


Рис. 9.4 — ЛЭС изделия с общим резервированием

Каждая j -я цепь имеет последовательную ЛЭС, поэтому согласно (9.1) можем вероятность безотказной работы этой цепи p_j выразить через вероятности безотказной работы элементов p_{ji}

$$p_j = \prod_{i=1}^n p_{ji}.$$

Мы как бы «свернули» каждую цепь, заменив ее одним элементом. При этом элементы остались подключенными параллельно (кроме коммутатора К). Следовательно, непосредственно на основе ЛЭС можем найти вероятность отказа резервированной части схемы $Q_{\text{рез}}$ и вероятность безотказной работы $P_{\text{рез}}$

$$Q_{рез} = \prod_{j=0}^m q_j = \prod_{j=0}^m (1 - p_j) = \prod_{j=0}^m \left(1 - \prod_{i=1}^n p_{ij} \right) = \prod_{j=0}^m \left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_{ij}) \right]; \quad (9.4)$$

$$P_{рез} = 1 - Q_{рез} = 1 - \prod_{j=0}^m (1 - p_j) = 1 - \prod_{j=0}^m \left(1 - \prod_{i=1}^n p_{ij} \right). \quad (9.5)$$

Полную вероятность безотказной работы P и полную вероятность отказа Q можем определить как для последовательного соединения коммутатора и резервированной части схемы

$$P = P_K P_{рез}; \quad Q = 1 - P = 1 - P_K P_{рез} = 1 - (1 - Q_K)(1 - Q_{рез}). \quad (9.6)$$

Сравним теперь рассмотренные виды резервирования между собой.

Численным расчетом по формулам (9.2, 9.3) и (9.4, 9.5) легко убедиться, что выигрыш в надежности для поэлементного резервирования выше, чем при общем резервировании. Надежность дополнительно снижается из-за наличия коммутатора, хотя обычно коммутатор содержит малое число элементов и имеет значительно более высокую надежность, чем основная часть схемы. Однако практическая реализация поэлементного резервирования — весьма трудная задача, для многих видов элементов вообще неразрешимая, так как и схемотехнические, и конструктивные решения необходимо вырабатывать заново. При общем резервировании можно использовать ранее разработанные конструктивные единицы, изменив только несущую конструкцию и добавив коммутационные устройства. Таким образом, можно говорить о комбинированном резервировании: исходя из возможности реализации и с точки зрения целесообразности часть схемы резервируется поэлементно, а другая часть — путем общего резервирования.

10. РЕСУРСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ

Любые ЭРИ, из которых состоит схема РЭС, а также многие конструктивные элементы имеют ограниченный ресурс работоспособности.

Для элементов *с расходом* материалов (например: переключатели, кнопки, реле, электродвигатели, электровакуумные приборы) ресурс может расходоваться либо в дискретные моменты их срабатывания, либо непрерывно, во время работы.

Ресурс элементов *без расхода* материалов (например: резисторы, конденсаторы, индуктивности, полупроводниковые компоненты) обычно расходуется как время их работы, так и в отсутствие электрической нагрузки (перерывы в работе, хранение, транспортировка).

Вводится понятие «*наработка*» как накопление числа событий, вызывающих расходование ресурса. Чаще всего наработку можно считать как накопление времени работы. Отдельно учитываются суммарные продолжительности простоя, хранения и транспортировки, так как показатели расходования ресурса для этих состояний будут другими.

Ресурсными показателями надежности являются:

- суммарное время использования по назначению $T_{\text{исп}}$;
- суммарное время технического обслуживания $T_{\text{ТО}}$;
- суммарное время ремонта $T_{\text{рем}}$;
- суммарное время эксплуатации $T_{\text{э}}$;
- суммарное время простоя, хранения и транспортировки $T_{\text{хр}}$;
- срок службы $T_{\text{сл}}$.

Величина суммарного времени эксплуатации определяется как сумма

$$T_{\text{э}} = T_{\text{исп}} + T_{\text{ТО}} + T_{\text{рем}};$$

срок службы составляют суммарные продолжительности всех состояний:

$$T_{\text{сл}} = T_{\text{э}} + T_{\text{хр}}.$$

Поскольку после возникновения неисправностей и их устранения показатели надежности могут изменяться, вводятся следующие вероятностные показатели использования:

- функция готовности $K_r(t)$ как отношение текущей наработки с суммарному времени эксплуатации;
- функция простоя $K_{\text{п}}(t)$, равная $1 - K_r(t)$.

При $t \rightarrow \infty$ функция готовности $K_r(t)$ стремится к некоторому пределу, который называется коэффициентом готовности K_r . Соответственно, пределом функции простоя $K_{\text{п}}(t)$ будет коэффициент простоя $K_{\text{п}}$:

$$K_r = \frac{T_{\text{исп}}}{T_{\text{исп}} + T_{\text{ТО}} + T_{\text{рем}}} = \frac{T_{\text{исп}}}{T_{\text{э}}};$$

$$K_{\text{п}} = 1 - K_r.$$

Функция готовности ремонтируемого изделия аналогична вероятности безотказной работы, а функция простоя — вероятности отказов. Для неремонтируемой (НР) необслуживаемой РЭА (НО) они совпадают. Обслуживаемая (О) РЭА имеет начальное значение $K_r(0)$, не равное единице. Для ремонтируемой (Р) РЭА $K_r(t)$ при возрастании t не стремится к нулю (рис. 10.1).

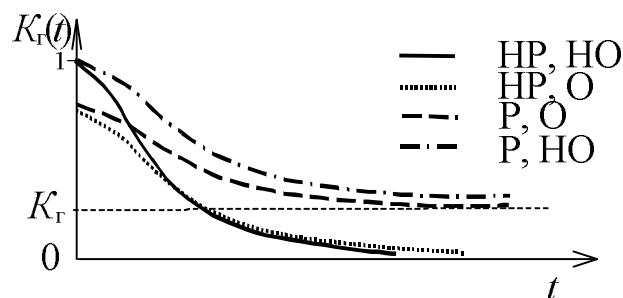


Рис. 10.1 — Зависимости функции готовности от времени для различных видов РЭС

11. ПРИНЦИПЫ И ПРИЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ

11.1. Основные принципы проектирования надежной аппаратуры

Принцип избыточности состоит в том, что применяются специальные технические решения, направленные на повышение надежности, но не необходимые для обеспечения работоспособности.

Исходя из **принципа равнопрочности** мероприятия по повышению надежности применяют в первую очередь к наименее надежным элементам: ищут и устраняют «узкие места» по надежности, приближая характеристики надежности элементов и узлов друг к другу.

Принцип системности предписывает обеспечивать высокую надежность на всех этапах жизненного цикла изделия: при разработке, производстве и эксплуатации.

Ясно, что все мероприятия можно проводить, если не нарушается **принцип целесообразности**: все технические решения должны быть экономически и технически оправданными.

11.2. Экономические ограничения при обеспечении надежности

Полная сумма затрат потребителя C складывается из ряда составляющих:

$$C = C_k + C_{нэ} + C_{то} + C_{рем} + C_{пф} + C_r, \quad (11.1)$$

где C_k — стоимость конструкции, т.е. самого изделия;
 $C_{нэ}$ — затраты на нормальную эксплуатацию (использование) изделия;
 $C_{то}$ — стоимость технического обслуживания;
 $C_{рем}$ — затраты на ремонт;
 $C_{пф}$ — потери от невыполнения функций;
 C_r — потери, связанные с гибелью людей из-за невыполнения РЭС своих функций.

Стоимость изделия C_k растет с ростом достигнутого уровня надежности, так как для повышения надежности приходится применять все более дорогие элементы, проводить глубокие научные исследования, разрабатывать новые технологии и тому подобное. При достаточно большом времени наработки (1000 часов и более) практически невозможно достичь вероятности безотказной работы, равной единице. По этой причине обычно зависимость стоимости изделия от этой вероятности аппроксимируют функцией вида

$$C_k = \frac{h}{(1 - P^a)^b},$$

где h, a, b — параметры, определяемые на основе опытных данных.

При использовании изделия затраты $C_{нэ}$ связаны с потребляемой электроэнергией, оплатой труда оператора и т.п. Обычно считают, что они практически не зависят от надежности.

Остальные слагаемые в формуле (11.1) прямо зависят от надежности и с ее ростом снижаются. Если обозначить сумму их $C_{\text{пот}}$ — суммарные потери из-за отказов, то качественно картина зависимости от вероятности безотказной работы приобретает следующий вид (рис. 11.1).

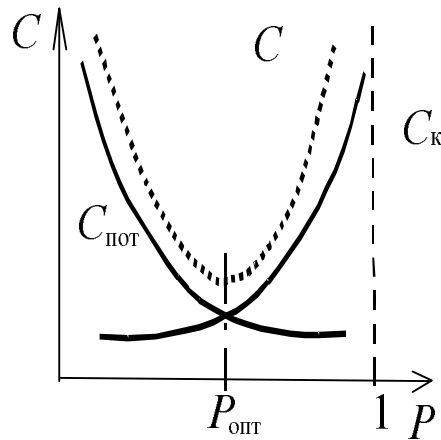


Рис. 11.1 — Вид зависимостей составляющих затрат от вероятности безотказной работы изделия

Таким образом, для каждого данного изделия существует оптимальное с точки зрения суммарных затрат потребителя значение показателей надежности.

11.3. Меры повышения надежности при разработке изделия

Итак, в соответствии с принципом равнопрочности, разработчик должен проанализировать схему и конструкцию первоначального варианта изделия с целью выявить наименее «прочные» в смысле надежности элементы и узлы. Затем, применяя различные виды избыточности, следует найти новые технические решения.

Различают **информационную** и **аппаратную** избыточность.

Пространственная информационная избыточность реализуется путем параллельного хранения и обработки информации. При отказе в одном из каналов информация не теряется.

Если одну и ту же информацию обрабатывать несколько раз, то этот метод относится к **временной** избыточности: информацию можно частично или полностью восстановить при самоустраняющихся отказах (сбоях).

Используют следующие виды аппаратной избыточности:

- рациональный подбор типов элементов с учетом их надежности;
- применение электрически разгруженных режимов (см. рис. 2.2);
- снижения уровня внешних воздействий (например, уменьшение рабочих температур);
- введение в схему контрольных точек, контрольных разъемов, контролируемых цепей и измерительных приборов;
- введение в схему защитных и стабилизирующих цепей;
- резервирование.

Наиболее радикальным, но и наиболее дорогостоящим путем является резервирование. По способу подключения различают «холодный» резерв, «горячий» резерв и резерв «полуразгруженный».

При «холодном» резерве резервные цепи до момента включения не находятся под электрической нагрузкой, благодаря чему экономится ресурс этих цепей. Однако для подключения резервной цепи и её активизация могут занимать значительное время, поэтому такое резервирование в сложных системах может быть неприемлемым.

«Горячий» резерв в любой момент готов к выполнению функций, но его ресурс расходуется одновременно с ресурсом основных цепей. Полуразгруженный резерв является компромиссом между двумя крайними случаями: в активном состоянии находятся только те узлы, включение которых требует значительного времени.

11.4. Избыточность при производстве

Для повышения надежности изделия в процесс производства вводятся дополнительные операции:

- входной контроль покупных ЭРИ;
- пооперационный контроль;
- анализ точности и устойчивости технологических процессов, выполнение периодической наладки оборудования;
- выходной контроль и испытания;
- тренировка (прогон).

При входном контроле измеряют основные параметры покупных ЭРИ, затем результаты статистически обрабатывают. Если используют **сплошной** контроль всех поступающих ЭРИ, то по результатам анализа можно выполнить отбраковку негодных изделий и отбор групп изделий с нужными пределами значений параметров. При выборочном контроле нет смысла отбраковывать отдельные негодные изделия: если таких изделий в выборке встречается слишком много (больше установленного граничного значения), то отбраковывается вся партия.

В результате пооперационного контроля выявляют дефекты изготовления отдельных узлов. Дефектные узлы отбраковывают или отправляют на доработку.

Техпроцессы периодически контролируют по результатам статистического анализа параметров изготавливаемых элементов или узлов. Вначале получают результаты первичного анализа контролируемого параметра x , по которым графически строят эмпирический закон распределения $p_1(x)$. Через установленный интервал времени проводят вторичный анализ, в результате которого получают новый эмпирический закон распределения $p_2(x)$ и сравнивают его с предыдущими результатами (рис. 11.2).

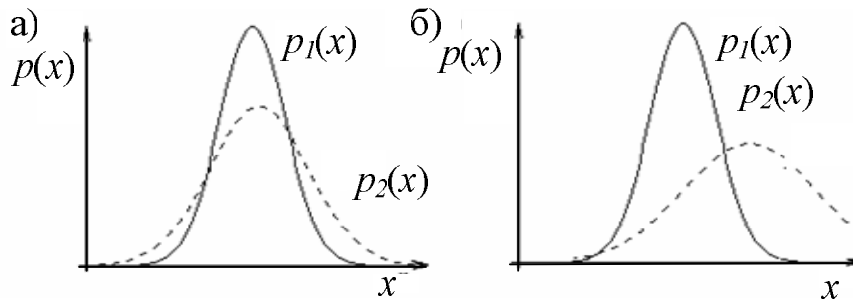


Рис. 11.2 — К анализу точности и устойчивости техпроцесса

Если форма распределения сохраняется, а различия в значениях среднего и дисперсии незначительны (см. рис. 11.2а), то процесс считается устойчивым. Снижение точности обусловлено естественными причинами (например, износом режущего инструмента для выполнения канавок в высокоомном слое при изготовлении резисторов). Для поддержания требуемой точности достаточно периодически выполнять подналадку техпроцесса.

Если же выяснилось, что форма распределения или ее параметры резко изменились (см. рис. 11.2б), то техпроцесс определяется как неустойчивый вследствие действия каких-то особых причин нарушения точности (например, неисправность основных контрольно-измерительных приборов). В этом случае меры по восстановлению устойчивости следует предпринимать немедленно.

Готовое изделие контролируют по всем параметрам: выходной контроль имеет целью оценить соответствие изделия требованиям технических условий (ТУ) и выполнить при необходимости дополнительную настройку или доработку. Различные испытания (например, типовые, ресурсные, испытания на надежность) в нормальных и ужесточенных условиях проводят с целью оценить эффективность проведенных мероприятий и исследовать возможные пути дальнейшего повышения надежности.

Тренировка (прогон) всех изделий — вынужденная мера, связанная с наличием в покупных ЭРИ и элементах собственного изготовления скрытых дефектов (см. п. 8.1). Поскольку на начальном этапе эксплуатации из-за скрытых дефектов интенсивность отказов повышена, изготовитель вынужден устанавливать гарантийный срок, в течение которого он обязуется устранять отказы бесплатно для потребителя. Затраты производителя на гарантийный ремонт можно снизить, если перед поставкой изделий их включить в работу на некоторое время. При этом удастся выявлять и устранять скрытые дефекты на предприятии-изготовителе.

Оптимальное время прогона $t_{\text{пр.опт}}$ устанавливается путем сопоставления затрат на гарантийный ремонт $C_{\text{ГР}}$ и тренировку $C_{\text{пр}}$. Для этого составляются математические модели затрат — зависимости от времени прогона $t_{\text{пр}}$ затрат $C_{\text{ГР}}(t_{\text{пр}})$ и $C_{\text{пр}}(t_{\text{пр}})$ с целью поиска минимума суммарных затрат $C_{\text{СПГ}}$ (рис. 11.3).

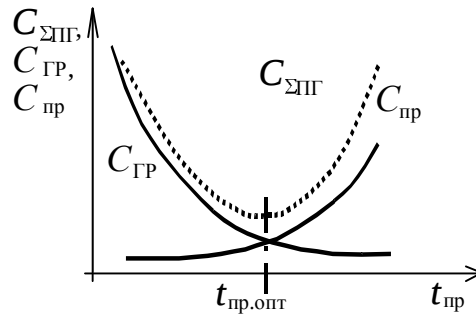


Рис. 11.3 — Вид зависимостей затрат на прогон и гарантийный ремонт от времени прогона

11.5. Меры повышения надежности при эксплуатации

Производитель обязан заботиться об эффективной эксплуатации своих изделий. Для этого создаются технические центры, разрабатывается и выпускается специальное контролирующее оборудование, запасные части и принадлежности (ЗИП), проводится обучение персонала технических центров и операторов, непосредственно работающих с выпускаемой аппаратурой.

Основным способом поддержания надежности является **техническое обслуживание** (ТО). В состав операций по ТО, которые выполняются с определенной периодичностью, могут входить следующие действия:

- контроль параметров изделия, оценка состояния элементов конструкции;
- удаление пыли, микроорганизмов и окислов;
- настройка отдельных параметров;
- профилактическая замена отдельных элементов с признаками повреждений;
- массовая замена элементов с истощенным ресурсом.

При массовой замене элементов зависимость интенсивности отказов от времени наработки приобретает немонотонный характер (рис. 11.4).



Рис. 11.4 — Характерный вид зависимости интенсивности отказов обслуживаемого изделия от времени наработки

В моменты t_1 , t_2 , t_3 наступают износные отказы элементов первого, второго и третьего типа, соответственно. После их замены на некоторое время наступает стабилизация, но, как правило, интенсивность отказов стабилизируется на все более высоком уровне из-за накопления последствий деградационных процессов. Количество таких массовых замен определяют с точки зрения экономической целесообразности.

ЧАСТЬ 4. ТОЧНОСТЬ ВЫХОДНОГО ПАРАМЕТРА И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ ИЗДЕЛИЯ

12. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Значение выходного параметра радиоэлектронного функционального узла (РЭФУ) или всего изделия в целом y определяется значениями параметров x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) схемных элементов и функциональной зависимостью между ними, соответствующей выбранным схмотехническим решениям:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (12.1)$$

В процессе расчета схемы по необходимому (расчетному) значению выходного параметра $y_{\text{рас}}$ определяют расчетные значения параметров элементов $x_{i\text{рас}}$. Для каждого электрорадиоизделия (ЭРИ) его основной параметр x_i может отличаться от расчетного номинала $x_{i\text{рас}}$ на некоторую величину Δx_i

$$x_i = x_{i\text{рас}} + \Delta x_i,$$

в силу чего выходной параметр также приобретает отклонение Δy

$$y = y_{\text{рас}} + \Delta y.$$

К отклонениям Δx_i входных параметров от их расчетных номиналов приводят различные причины:

- дискретность сетки номиналов (для покупных электрорадиоизделий);
- технологический разброс;
- уход параметров при изменении условий (например, температуры окружающей среды);
- старение элементов схемы.

Исходя из назначения РЭФУ в технических условиях (ТУ) на изделие задаются **границы поля допуска** $[y_{\text{min}}, y_{\text{max}}]$ на выходной параметр (иногда применяется одностороннее ограничение). Рассматриваются две задачи: задача обеспечения **технологической точности** и задача обеспечения **параметрической надежности**. Первая относится к моменту выпуска изделия с предприятия-изготовителя, а вторая — к процессу эксплуатации, в связи с чем для первой задачи уход параметров и старение элементов не рассматриваются.

13. АНАЛИЗ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ИЗДЕЛИЯ

13.1. Задачи, связанные с обеспечением точности

Задача обеспечения *технологической точности* всех изделий данного вида ставится следующим образом.

Считаются известными следующие условия:

- расчетное значение выходного параметра;
- допустимые абсолютные отклонения «вверх» $\Delta u_{\text{доп}+}$ и «вниз» $\Delta u_{\text{доп}-}$, которым соответствует поле допуска $[u_{\text{рас}} - \Delta u_{\text{доп}-}, u_{\text{рас}} + \Delta u_{\text{доп}+}]$;
- функциональная зависимость выходного параметра от параметров элементов (12.1).

Для конкретных условий производства требуется определить номиналы входных параметров ЭРИ x_{i0} и допуски на них.

При решении данной задачи необходимо:

- определить статистические характеристики номиналов ЭРИ x_i ;
- оценить влияние номиналов ЭРИ на выходной параметр РЭФУ;
- установить требования на разброс номиналов ЭРИ;
- выбрать способ технической реализации требуемой точности.

На этапе освоения производства процент брака по точности (относительное число изделий, выходной параметр которых выходит за поле допуска) заранее неизвестен и его требуется определить с учетом разброса номиналов реальных ЭРИ.

13.2. Статистические характеристики ЭРИ

В состав изделий входят как покупные ЭРИ, так и ЭРИ собственного изготовления. Номинальные значения параметра для покупных ЭРИ обычно соответствуют стандартным сеткам номиналов, а для собственных ЭРИ (катушки индуктивности, трансформаторы и т.п.) могут быть взяты равными расчетным.

Для общности рассуждений будем полагать, что расчетный номинал $x_{i\text{рас}}$ параметра i -го ЭРИ отличается от «паспортного» номинала x_{0i}

$$x_{0i} = x_{i\text{рас}} + x_{i\text{дет}},$$

где $\Delta x_{\text{дет}}$ — детерминированная составляющая отклонения (может быть определена как по величине, так и по знаку).

Значение параметра x_i каждого ЭРИ из партии может отличаться от номинального и от значений параметра других ЭРИ, причем технологический разброс носит случайный характер

$$x_i = x_{0i} + \Delta x_{i\text{сл}} = x_{i\text{рас}} + \Delta x_{i\text{дет}} + \Delta x_{i\text{сл}} = x_{i\text{рас}} + \Delta x_i,$$

где $\Delta x_{i\text{сл}}$ — случайная составляющая отклонения;

Δx_i — полное отклонение.

Для партии ЭРИ можно определить только статистические характеристики: среднее значение $\bar{x}_i$, дисперсию отклонений s_{xi}^2 , дифференциальный закон распределения $p(x_i)$ и некоторые другие характеристики.

13.3. Связь отклонений входных и выходных параметров

При малых отклонениях входных параметров Δx_i от их расчетных значений $x_{i\text{рас}}$ отклонения выходного параметра Δy от расчетного значения $y_{\text{рас}}$ могут быть найдены аналитически, если известна модель РЭФУ вида (12.1). Для этого используется разложение функции в ряд Тейлора с удержанием только линейных членов ряда

$$\Delta y = \sum_{i=1}^N \left. \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_N)}{\partial x_i} \right|_{x_{i\text{рас}}} \cdot \Delta x_i, \quad (13.1)$$

так что полное отклонение Δy состоит из вкладов Δy_i , обусловленных отклонениями параметров отдельных элементов

$$\Delta y_i = \left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{x_{i\text{рас}}} \cdot \Delta x_i.$$

Входящие в (13.1) значения производных могут служить мерой влияния входных параметров на выходной, однако для практики такая мера неудобна, так как это, в общем случае, размерная величина. Для устранения трудностей вводят в рассмотрение **относительные отклонения** для входных и выходных параметров

$$d x_i = \frac{\Delta x_i}{x_{i\text{рас}}} \cdot 100\%, \quad d y = \frac{\Delta y}{y_{\text{рас}}} \cdot 100\%, \quad d y_i = \frac{\Delta y_i}{y_{\text{рас}}} \cdot 100\%.$$

Тогда вместо (13.1) используют соотношение

$$d y = \sum_{i=1}^N K_{bi} \cdot d x_i, \quad (13.2)$$

где K_{bi} — **коэффициент влияния** i -го параметра:

$$K_{bi} = \left. \frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \right|_{x_{i\text{рас}}} \cdot \frac{x_{i\text{рас}}}{y_{\text{рас}}} = \left. \frac{\partial (\ln f)}{\partial x_i} \right|_{x_{i\text{рас}}} \cdot x_{i\text{рас}}. \quad (13.3)$$

Формула (13.3) — расчетное соотношение, тогда как **определение** понятия коэффициента влияния следует из (13.2)

$$K_{bi} = \frac{\delta y_i}{\delta x_i} \quad (13.4)$$

Таким образом, коэффициент влияния является как бы *коэффициентом передачи* между относительным отклонением параметра данного элемента и соответствующим ему относительным отклонением выходного параметра. На основе определения коэффициента влияния (13.4) можно найти значения K_{vi} , даже если аналитический вид зависимости (12.1) не известен путем непосредственного моделирования малых отклонений в численной или физической модели.

Соотношения (13.1, 13.2) выведены в предположении, что отклонения параметров элементов известны, поэтому при оценке детерминированных (систематических) отклонений выходного параметра их применяют непосредственно. Такая ситуация встречается, например, при расчете температурных отклонений, когда температурные коэффициенты известны.

На практике чаще стоит задача оценки *статистических характеристик* случайных отклонений выходного параметра при известных характеристиках случайных отклонений параметров элементов. Среднее значение случайной величины есть величина детерминированная, поэтому среднее значение выходного параметра можно найти с помощью (13.1, 13.2), куда вместо номиналов подставляются средние значения параметров ЭРИ. Дисперсию случайных отклонений, являющуюся мерой разброса, таким путем определить нельзя. Необходимо воспользоваться формулой статистического суммирования, которая при независимых отклонениях имеет вид

$$s_y^2 = \sum_{i=1}^N K_{vi}^2 \cdot s_{xi}^2, \quad (13.5)$$

где s_y^2, s_{xi}^2 — дисперсии случайных относительных отклонений выходного параметра и параметров ЭРИ, соответственно.

Предельные относительные отклонения, задаваемые в ТУ, пропорциональны значениям корней квадратных из дисперсий. Если входные и выходные параметры подчиняются одному и тому же закону распределения (чаще всего нормальному), то формула статистического суммирования для предельных допустимых отклонений $\delta y_{\text{доп}}$ и $\delta x_{i\text{доп}}$ приобретает вид

$$(\delta y_{\text{доп}})^2 = \sum_{i=1}^N (K_{vi} \delta x_{i\text{доп}})^2. \quad (13.6)$$

13.4. Синтез допусков на параметры элементов и выбор номиналов

Для упрощения выкладок будем считать, что границы поля допуска выходного параметра изделия симметричны относительно расчетного номинала $y_{\text{рас}}$. Тогда можно ввести допустимое абсолютное отклонение $\Delta y_{\text{доп}} = \Delta y_{\text{доп}+} = \Delta y_{\text{доп}-}$ и допустимое относительное отклонение $\delta y_{\text{доп}}$

$$d y_{\text{доп}} = \frac{\Delta y_{\text{доп}}}{y_{\text{рас}}} \cdot 100\%.$$

Обычно полагают, что допускается некоторое отклонение среднего значения выходного параметра $\bar{y}$ партии изделий от расчетного $y_{\text{рас}}$. Для описания таких отклонений вводят относительное отклонение $\delta_{\text{ср}}$ среднего значения от расчетного

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{\bar{y} - y_{\text{рас}}}{y_{\text{рас}}} \cdot 100\% \quad (13.7)$$

и коэффициент относительной асимметрии $\beta_{\text{ср}}$

$$\beta_{\text{ср}} = \left| \frac{d_{\text{ср}}}{d y_{\text{доп}}} \right| \cdot 100\%. \quad (13.8)$$

В требованиях ТУ задается допустимое значение коэффициента относительной асимметрии $\beta_{\text{доп}}$ выходного параметра.

Основой для установления допусков на входные параметры служит соотношение (13.6). Однако данная задача в математике относится к некорректно поставленным, так как необходимо определить значения N неизвестных допусков, имея только одно условие: суммарное относительное отклонение выходного параметра не должно превышать допустимой величины. Подобные задачи решают методом последовательных приближений.

Шаг 1. В первом приближении полагают, что **вклады** отклонений каждого входного параметра одинаковы, то есть все члены суммы в правой части (13.6) одинаковы. Тогда допустимые относительные отклонения каждого из N входных параметров $\delta x_{\text{идоп}}$ распределяются в соответствии со значениями коэффициентов влияния

$$\delta x_{\text{идоп}} = \frac{\delta y_{\text{доп}}}{K_{\text{в}i} \sqrt{N}}. \quad (13.9)$$

Шаг 2. Стараются подобрать допустимые отклонения, максимально близкие к стандартным (например, 5%, 10%, 20%). Суммируют полученные отклонения по формуле (13.6) и проверяют, не превышает ли допуск. В случае превышения выбирают элементы, точность которых наиболее просто повысить (например, используя прецизионные элементы или соединения однотипных элементов — «составной номинал»), устанавливают для них более жесткие допуски и повторяют проверку.

Шаг 3. По стандартной сетке номиналов, жестко связанной с допустимыми относительными отклонениями, выбирают номиналы параметров элементов x_{0i} , максимально близкие к расчетным. После подстановки этих номиналов в формулу (12.1) получают значение y_0 , которое может отличаться от расчетного. Рассчитывают достигнутое значение относительного отклонения δ_0 полученного значения y_0 от расчетного и значение коэффициента относительной асимметрии по формулам (13.7, 13.8)

$$\delta_0 = \frac{\bar{y} - y_0}{y_0} \cdot 100\%, \quad \beta_0 = \left| \frac{\delta_0}{\delta y_{\text{доп}}} \right| \cdot 100\%.$$

Сравнивают значение β_0 с допустимым $\beta_{\text{доп}}$. Если $\beta_0 \leq \beta_{\text{доп}}$, то выбор считается удовлетворительным, в противном случае пытаются подобрать другие номиналы. Если это не удастся сделать из-за излишней «грубости» сетки номиналов, выбирают более жесткие допуски (более «тонкую» сетку) для соответствующих элементов.

13.5. Обеспечение точности выходного параметра методом «замыкающего звена»

На практике часто встречаются случаи, когда методику полного синтеза допусков, рассмотренную выше, применить невозможно. Например, при выполнении второго шага оказалось, что для части элементов нет возможности выбрать пределы допусков: они велики и физически не могут быть уменьшены. Тогда в схеме выбирается один элемент, параметр которого x_j легче всего варьировать. Если допуски на остальные элементы уже выбраны, то для допуска $\delta x_{j\text{доп}}$ из (13.6) получим условие

$$\delta x_{j\text{доп}} \leq \sqrt{\delta y_{\text{доп}}^2 - \sum_{i \neq j}^N K_{vi}^2 \delta x_{i\text{доп}}^2}.$$

Здесь возможны три ситуации:

- 1) подкоренное выражение положительно, полученный допуск соответствует одному из стандартных рядов;
- 2) расчетный допуск является весьма жестким (1% и менее);
- 3) подкоренное выражение отрицательно.

Первый случай, фактически, уже рассмотрен в п. 13.4. Во втором случае в качестве замыкающего звена можно использовать прецизионный, подстроечный или подбираемый элемент. В третьем случае принципиально невозможно обеспечить требуемую точность выбором одного номинала для замыкающего звена: необходимы настроечные операции, при этом сам элемент может быть подбираемым либо подстраиваемым.

14. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ

14.1. Задачи, связанные с параметрической надежностью

Исходные ограничения для задачи обеспечения *параметрической надежности* составляют требования ТУ на эксплуатационные допуски для основных параметров изделия.

Целью является поддержание значений выходных параметров изделия в заданных пределах во время длительной эксплуатации. Иногда задача ставится в более узком смысле: рассматривается стабильность выходного параметра при изменении влияющего фактора (например, температуры) в заданных пределах.

Соответствующие операции выполняются в ходе технического обслуживания (ТО):

- вновь настраиваются подстроечные элементы;
- подбираются номиналы подбираемых элементов;
- заменяются элементы, уход параметров которых превысил допустимые пределы.

Для установления периодичности ТО проводят специальные исследования по выявлению и установлению количественных характеристик изменения параметров элементов из-за их старения и действия дестабилизирующих факторов, (например, температуры окружающей среды).

14.2. Установление регламента технического обслуживания на основе линейных моделей ухода параметров

Обычно используют линейные модели ухода параметров, так как характеристики более сложных моделей получить сложно. Общая линейная модель ухода параметра $x(t)$ во времени имеет следующий вид

$$x(t) = A + B \cdot t, \quad (14.1)$$

где A и B — случайные величины с известными средними значениями $\bar{A}, \bar{B}$ и дисперсиями σ_A^2, σ_B^2 .

Часто оказывается достаточно рассмотреть упрощенные варианты линейной модели.

Вариант 1. Модель с детерминированным средним значением и случайным уходом, в которой $A = \bar{x}$; $\bar{B} = 0$:

$$x(t) = \bar{x} + B \cdot t. \quad (14.2)$$

Вариант 2. Модель с детерминированным уходом, в которой $B = b$ (константа):

$$x(t) = A + b \cdot t. \quad (14.3)$$

Пусть нижняя граница допуска для x есть x_1 , а верхняя — x_2 . Тогда графически характер ухода параметра в соответствии с (14.2) и (14.3) будет иметь следующий вид (рис. 14.1).

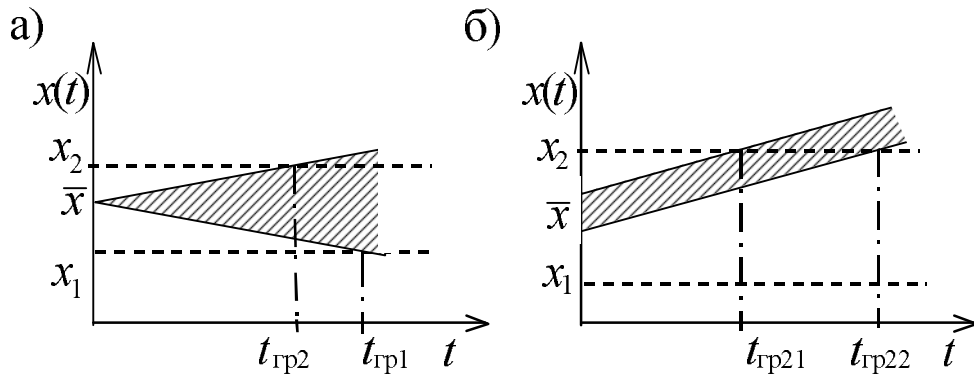


Рис. 14.1 — Характерный вид ухода параметров для моделей со случайным (а) и детерминированным уходом (б)

Для установления регламента технического обслуживания необходимо знать характер распределения случайных величин и задаться вероятностью достижения границ поля допуска $P_{гр}$. В частности, для нормально распределенной случайной величины известно, что с определенной вероятностью она находится вокруг среднего значения в пределах интервала $[-c\sigma, c\sigma]$, где σ — среднеквадратическое отклонение (корень квадратный из дисперсии), а константу c можно найти по таблицам нормального распределения.

Из модели (14.2) (см. рис. 14.1а) следует условие определения граничных значений времен $t_{гр1}$ и $t_{гр2}$:

$$\begin{cases} x_1 = \bar{x} - c\sigma_B t_{гр1} \\ x_2 = \bar{x} + c\sigma_B t_{гр2} \end{cases} \quad (14.4)$$

Из модели (14.3) также можно найти условие для двух граничных значений (в примере на рис.14.1б граница 1 не достигается):

$$\begin{cases} x_{21} = \bar{A} + c\sigma_A + bt_{гр21} \\ x_{22} = \bar{A} - c\sigma_A + bt_{гр22} \end{cases} \quad (14.5)$$

На практике следует выбирать минимальное значение из двух возможных.

Для общей линейной модели (14.1) легко получить аналогичные соотношения путем объединения (14.4) и (14.5).

15. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ РЭА

15.1. Общие принципы

Здесь также, как и при обеспечении надежности по внезапным отказам, повышение параметрической надежности достигается путем введения **избыточности** в схему, конструкцию, процесс производства и эксплуатации. Выявление «узких мест» — узлов и элементов, определяющих параметрическую надежность — осуществляется на основе **принципа равнопрочности**, который здесь понимается как достижение одинакового влияния на стабильность выходного параметра РЭА.

Основным инструментом анализа перед принятием решений об изменении схем и конструкции является сравнение **коэффициентов влияния** отдельных элементов и функциональных узлов (см. п. 12.3). Очевидно, что первоочередное внимание следует уделять элементам и узлам с наибольшими значениями этих коэффициентов. Однако в целом принцип равнопрочности может применяться на различных уровнях (таблица 15.1).

Таблица 15.1 — Характеристика принципа равнопрочности при обеспечении параметрической надежности

Уровень	Цель	Приемы
Элементы	Обеспечить близкие значения K_{vi}	Подбор элементов и режимов их работы.
Вклады элементов	Обеспечить близкие значения $K_{vi}\delta_i$	Выбор схем, менее чувствительных к отклонениям параметров элементов.
Вклады узлов	Обеспечить близкие значения $\sum_{i=1}^{N_j} (K_{vi}\delta_i)^2$, $j = 1, 2, \dots, n$	Деление схемы устройства на схемы n узлов так, чтобы влияние параметров узлов на выходной параметр было примерно одинаковым.

15.2. Приемы обеспечения параметрической надежности

Возможности подбора элементов ограничены, во-первых, из-за физических ограничений, связанных с принципом их действия, а во-вторых, экономическими факторами: более стабильные элементы, как правило, дороже менее стабильных.

Из всех факторов, влияющих на стабильность параметров элементов, наиболее существенным являются температура и влажность. Дополнительные меры термостабилизации, термостатирования и влагозащиты требуют дополнительных затрат, а также приводят к усложнению конструкции, увеличению массы и габаритов изделия.

Задачи разработки схем, малочувствительных к изменению параметров элементов, решаются специфическими приемами (например, стабильность коэффициента усиления усилителя может быть повышена путем увеличения собственно-

го коэффициента усиления и глубины отрицательной обратной связи; температурную стабильность вреязадающей RC -цепи можно повысить, соответственно подбирая температурные коэффициенты сопротивления резистора и емкости конденсатора), которые здесь подробно не рассматриваются.

В качестве общих приемов обычно используют:

- «составной» номинал;
- подбираемый элемент;
- «магазин» элементов;
- подстроечный элемент.

Идея «составного» номинала состоит в следующем (рис. 15.2).

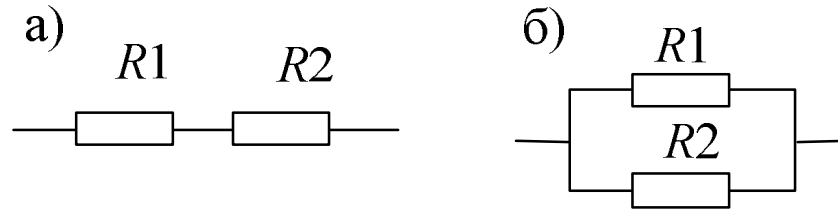


Рис. 15.2 — Последовательная (а) и параллельная (б) схемы составного номинала

Пусть, например, резистор R составлен из последовательно соединенных резисторов $R1$ и $R2$. Его номинал будет равен сумме номиналов $R = R1 + R2$. Найдём относительное отклонение δ номинала R при условии, что относительные отклонения составляющих δ_1 и δ_2 случайны и независимы.

Абсолютные отклонения Δ_1, Δ_2 будут равны

$$\Delta_1 = \delta_1 R1; \quad \Delta_2 = \delta_2 R2.$$

Абсолютное отклонение Δ номинала R можно найти на основе формулы статистического суммирования (13.5):

$$\Delta = \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2},$$

тогда относительное отклонение δ будет равно

$$\delta = \frac{\Delta}{R} = \frac{\sqrt{\delta_1^2 R1^2 + \delta_2^2 R2^2}}{R1 + R2} = \sqrt{\delta_1^2 K_{B1}^2 + \delta_2^2 K_{B2}^2},$$

где $K_{B1} = \frac{R1}{R1 + R2}$; $K_{B2} = \frac{R2}{R1 + R2}$ — коэффициенты влияния $R1, R2$ на номинал R , соответственно.

Пусть, например, $R1 = R2$; $\delta_1 = \delta_2 = \delta_{12}$. Из полученного соотношения следует, что $\delta = \frac{\delta_{12}}{\sqrt{2}}$. Таким образом, относительное отклонение составного номинала

меньше, чем относительные отклонения составляющих. Нетрудно убедиться, что тот же вывод справедлив и при параллельном соединении (см. рис. 15.2). Полезно

также помнить, что при составлении номинала из n составляющих с одинаковыми номиналами результирующее относительное отклонение будет в $\sqrt{n}$ раз меньше отклонений составляющих.

Введение в схему подбираемого элемента потребует только изменения конструкции его крепления. При использовании печатного монтажа этот элемент должен крепиться на стойках, чтобы при перепайке не произошло отслаивание печатных проводников (рис. 15.3).

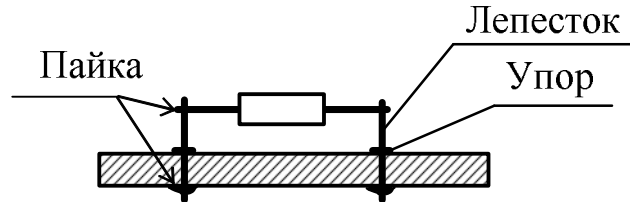


Рис. 15.3 — Установка подбираемого резистора на стойках

Для того, чтобы в процессе эксплуатации все возможные номиналы, из которых осуществляется подбор, были доступны в любой момент, применяют «магазин» элементов: перепайке подлежит только проволочная перемычка (рис. 15.4).

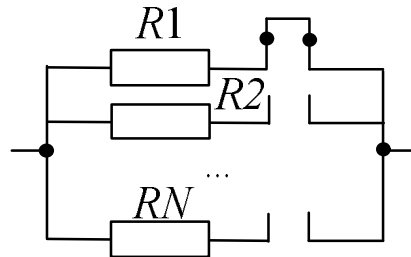


Рис. 15.4 — Схема «магазина» элементов

При введении в схему подстроечных элементов необходимо иметь в виду, что, во-первых, они существенно дороже постоянных элементов, во-вторых схема включения подстроечных элементов должна быть рассчитана с учетом их конструктивных пределов регулировки. Например, подстроечные резисторы позволяют изменять номинал R от полного значения до нуля. Чтобы обеспечить регулировку в пределах $\pm\delta\%$ при условии, что в исходном состоянии движок резистора должен быть в среднем положении, в схему последовательно с подстроечным резистором должны быть включены два постоянных резистора (рис. 15.5).

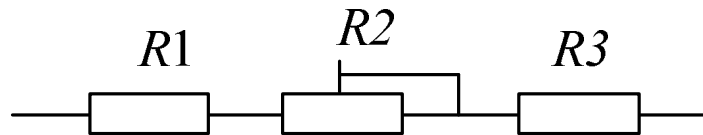


Рис. 15.5 — Схема включения подстроечного резистора

Если суммарное сопротивление цепи должно быть равно R , то для определения номиналов будем иметь систему уравнений

$$\begin{cases} R1 + R2/2 + R3 = R \\ R1 + R2 + R3 = (1 + 100 \cdot \delta) R \\ R1 + R3 = (1 - 100 \cdot \delta) R \end{cases}$$

Данную систему нетрудно решить обычными методами.

15.3. Ограничения при проектировании

Помимо упоминавшихся выше экономических и массо-габаритных ограничений на пути реализации высокостабильных схем и конструкций лежит соображение о снижении надежности по внезапным отказам из-за простого увеличения числа элементов. Вероятность внезапных отказов $Q_{\text{вн}}$, как известно (см. п. 12.1), растет с ростом числа элементов N . Если построить математическую модель вероятности параметрических отказов, то можно найти оптимальную степень сложности, при которой они сравниваются (рис. 15.6).

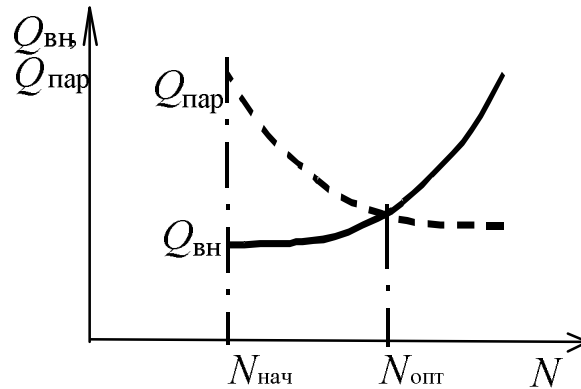


Рис. 15.6 — Вид зависимостей вероятностей внезапных и параметрических отказов от числа элементов

Видно, что усложнять схему для повышения параметрической надежности имеет смысл только в том случае, когда при начальном числе элементов $N_{\text{нач}}$ вероятность внезапных отказов меньше вероятности параметрических. Оптимальным будет такое число элементов $N_{\text{опт}}$, при котором эти вероятности сравниваются: дальнейшее увеличение сложности схемы не приведет к возрастанию надежности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник конструктора РЭА: общие принципы конструирования / Под. ред. Р.Г. Варламова. — М.: Сов. Радио, 1980. — 480 с.
2. Спокойный Ю.Е. Тепломассообмен в радиоэлектронной аппаратуре: лабораторный практикум / Ю.Е. Спокойный, В.В. Сибиряков.— К.; Одесса: Высш. школа, 1988. — 224 с.
3. Гелль П.П. Конструирование и микроминиатюризация РЭА / П.П. Гелль, Н.К. Иванов-Есипович. — Л.: Энергоатомиздат, 1984. — 536 с.
4. Токарев М.Ф. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры / М.Ф. Токарев, Е.Н. Талицкий, В.Ф. Фролов. — М.: Радио и связь, 1984. — 244 с.
5. Теория надежности радиоэлектронных систем в примерах и задачах / Под ред. Г.В. Дружинина. — М.: Энергия, 1976. — 448 с.