

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиоэлектронных средств

Н.И. Каленкович, Н.С. Образцов, А.М. Ткачук

***ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ***

Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей I-01 03 00 «Экономика и управление
на предприятии» и I-02 02 00 «Маркетинг»
дневной и заочной форм обучения

Минск 2006

УДК 681.321(075.8)
ББК 32.844-02 я 73
К 17

Рецензент:

ректор Минского государственного высшего радиотехнического колледжа,
кандидат технических наук, профессор Н.А. Цырельчук

Каленкович Н.И.

К 17 Основы конструирования радиоэлектронной аппаратуры: Учеб.-метод. пособие для студ. спец. I-01 03 00 «Экономика и управление на предприятии» и I-02 02 00 «Маркетинг» дневной и заоч. форм обуч./ Н.И. Каленкович, Н.С. Образцов, А.М. Ткачук. – Мн.: БГУИР, 2006. – 150 с.
ISBN 985-444-918-1

В пособии рассмотрены элементная база, порядок и основные правила конструирования радиоэлектронных средств (РЭС). Рассмотрены методы электрических соединений и вопросы проектирования печатных плат. Изложены защитные мероприятия конструкции РЭС от основных дестабилизирующих факторов – тепла, влаги и механических воздействий.

Учебно-методическое пособие может быть полезным и студентам других специальностей, изучающим основы конструирования РЭС.

УДК 681.321(075.8)
ББК 32.844-02 я 73

ISBN 985-444-918-1

© Каленкович Н.И., Образцов Н.С.,
Ткачук А.М., 2006
© БГУИР, 2006

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БИС – большая интегральная схема
БНК – базовая несущая конструкция
ВОКС – волоконно-оптические кабели и соединители
ГИС – гибридная интегральная схема
ГФ – гетинакс фольгированный
ЕСКД – единая система конструктивной документации
ИМС – интегральная микросхема
КД – конструкторская документация
МВ – механические воздействия
ОУ – операционный усилитель
ПП – печатная плата
РП – рельефная плата
РЭС – радиоэлектронное средство
САПР – система автоматизированного проектирования
СБИС – сверхбольшая интегральная схема
СВЧ – сверхвысокая частота
СФ – стеклотекстолит фольгированный
ТЗ – техническое задание
ТКЕ – температурный коэффициент емкости
ТКС – температурный коэффициент сопротивления
ТТ – технические требования
ЭА – электронная аппаратура

ВВЕДЕНИЕ

Широкое использование изделий радиоэлектроники во всех сферах человеческой деятельности обуславливает большой объем технических, эксплуатационных и экономических требований как к самим радиоэлектронным средствам (РЭС), так и к элементной базе, материалам, конструктивно-технологическим решениям и т.п. Исключительно быстро возрастают сложность РЭС и их функциональная нагрузка. Поэтому старые методы их создания и использование дискретных элементов в настоящее время не позволяют разрешить постоянно углубляющееся противоречие между усложнением РЭС, увеличением их функциональных задач и повышением надёжности, экономичности, технологичности, снижением массогабаритных показателей.

Для объективной экономической оценки принимаемых технических решений экономисту или менеджеру необходимо в определенной степени иметь представление об объектах экономической оценки – радиоэлектронной и электронной аппаратуре: организации процесса проектирования, рабочей документации, конструктивных системах РЭС, материалах и элементной базе, электрических соединениях в конструкциях РЭС, организации защиты от дестабилизирующих факторов, компоновке и т.д.

Курс лекций по дисциплине «Основы конструирования радиоэлектронной аппаратуры» в комплексе с практическими и лабораторными занятиями и курсовым проектированием призван дать соответствующую подготовку студентам инженерно-экономического факультета, а предлагаемое учебное пособие послужит хорошим подспорьем для решения этой задачи.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ РЭС. ОСНОВЫ И МЕТОДЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ

1.1. Основные задачи и проблемы современного конструирования

Цель процесса конструирования – создавать малогабаритную, высокоэффективную и надёжную аппаратуру, производство и эксплуатация которой требуют ограниченного расхода трудовых, энергетических и материальных ресурсов. Для достижения этой цели решают, как правило, три основные задачи современного конструирования:

- комплексная микроминиатюризация;
- защита от дестабилизирующих факторов (тепло, влага, механические воздействия и др.);
- повышение технологичности.

При решении задачи комплексной микроминиатюризации РЭС ищут резервы миниатюризации всех составных частей изделия, не ограничиваясь толь-

ко узлами, в которых можно применить интегральные микросхемы (ИМС), т.е. элементной базы, системы питания, охлаждения, автоматики и т.д.

Решение задачи комплексной микроминиатюризации РЭС начинается с формирования технических требований к проектируемому изделию в отношении максимального снижения габаритов, массы и энергопотребления. Это решение должно осуществляться по схмотехническому и конструкторскому направлениям взаимосвязанно и согласованно. Конструкторское направление включает решение трех основных вопросов комплексной микроминиатюризации:

- структура конструкции РЭС;
- материалы;
- элементная база.

При выборе оптимальной структуры конструкции РЭС по критерию комплексной микроминиатюризации необходимо использовать большие и сверхбольшие интегральные схемы (БИС и СБИС), волоконно-оптические кабели и соединители (ВОКС).

При выборе материалов для несущих конструкций и элементов необходимо применять лёгкие и высокопрочные материалы, например алюминиевые и магниевые сплавы.

Комплексная микроминиатюризация элементной базы – наиболее сложный вопрос, особенно в отношении элементов автоматики и коммутационных компонентов.

Вторая задача конструирования РЭС – защита от дестабилизирующих факторов (тепло, влага и др.) – возникла как побочное следствие миниатюризации.

Третья задача – повышение технологичности – решается на основе унификации и стандартизации. Избыточное разнообразие существующих в настоящее время схмотехнических и конструкторских решений резко снижает технологичность конструкции РЭС. Различают две разновидности технологичности – производственную и эксплуатационную.

Производственная технологичность – это минимальные трудовые и материальные затраты при изготовлении изделия.

Эксплуатационная технологичность – минимальные сроки для предупреждения, обнаружения и устранения неисправностей и отказов в работе аппаратуры.

1.2. Эволюция конструкций РЭС

Первые устройства проводной телеграфной связи появились в 1832 г. (русский изобретатель П.Л. Шиллинг). Первый в мире радиоприёмник, изобретённый А.С. Поповым, был продемонстрирован в 1895 г.

Конструкционное исполнение первых РЭС напоминало аппаратуру проводной связи (деревянный ящик, монтаж неизолированным проводом, контактирование с помощью винтов). Установка РЭС на суда и автомобили (1925–

1935 г.) привела к необходимости увеличения прочности и экранирования отдельных узлов с помощью металлического шасси. Увеличение серийности выпуска аппаратуры привело к созданию конструкторской иерархии (унификации и соподчинённости несущих базовых конструкций). Для защиты аппаратуры танков и самолётов (1935–1945 гг.) были разработаны герметичные корпуса, которые устанавливались на виброизоляторы (амортизаторы). Требование существенной минимизации массы и объема ракетной аппаратуры (1940–1950 гг.) привлекло к созданию микромодулей, печатных плат, полупроводниковых приборов, коаксиальных кабелей, полосковых линий, интегральных микросхем. Дальнейшее усложнение аппаратуры в 1960–1970 гг. привело к появлению элементов функциональной микроэлектроники. В настоящее время начинает развиваться наноэлектроника.

Условились различать следующие поколения РЭС.

РЭС первого поколения (20–50-е годы прошлого столетия) были построены с использованием электровакуумных ламп, дискретных электрорадиоэлементов (ЭРЭ), проводных электрических связей.

Ко второму поколению РЭС (50–60-е годы) относят конструкции РЭС на печатных платах и дискретных полупроводниковых приборах.

К третьему поколению относятся конструкции на печатных платах и ИМС малой степени интеграции (60–70-е годы).

В конструкциях РЭС четвёртого поколения применяются большие интегральные микросхемы (БИС), многослойные печатные платы, гибкие печатные шлейфы, микрополосковые линии. В интегральной электронике сохраняется главный принцип дискретной электроники – разработка электрической схемы по законам теории цепей. Этот принцип обуславливает рост числа элементов микросхемы и межэлементных соединений по мере усложнения выполняемых ею функций. Однако повышение степени интеграции микросхем и связанное с этим уменьшение размеров элементов имеет определённые пределы из-за возникающих проблем технологии изготовления, теплоотвода и др.

В РЭС пятого поколения находят применение приборы функциональной микроэлектроники. Функциональная микроэлектроника предполагает принципиально новый подход, позволяющий реализовать определённую функцию аппаратуры без применения стандартных базовых элементов, используя физические явления в твёрдых телах. При этом локальному объёму твёрдого тела придаются такие свойства, которые необходимы для выполнения данной функции, и промежуточный этап представления этой функции в виде эквивалентной электрической схемы не требуется. Функциональные микросхемы могут выполняться не только на основе полупроводников, но и на основе таких материалов, как сегнетоэлектрики, материалы с фотопроводящими свойствами и др. Для переработки информации можно использовать явления, не связанные с электропроводностью (например, оптические и магнитные явления в диэлектриках, закономерности распространения ультразвука и т.д.). С течением времени изменялось и понятие РЭС. Вначале использовалось понятие «аппарату-

ра». Аппаратура, используемая для решения технических задач обнаружения целей, наведения, навигации и т.д., называлась «радиотехническая аппаратура». Развитие ЭВМ и систем автоматики привело к появлению понятия «электронная аппаратура». Дальнейшее усложнение аппаратуры привело к понятию «радиоэлектронная аппаратура». Введение в состав аппаратуры различных электромеханических устройств, систем питания, теплоотвода и контроля привело к понятию «радиоэлектронное средство».

1.3. Виды изделий и элементная база РЭС

Конструкция характеризует структуру и свойства изделия, под которым понимается любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии. Изделия различаются по видам:

деталь – изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций;

сборочная единица – изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии-изготовителе с помощью сборочных операций;

комплекс – два изделия и более (состоящих, в свою очередь, из двух частей и более), не соединённых на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций;

комплект – два изделия и более, не соединённых на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера (комплект запасных частей, инструмента).

РЭС предназначены для передачи, приёма, хранения и преобразования информации, представленной в виде непрерывных или дискретных электромагнитных сигналов. Устройства, работающие с непрерывными электромагнитными сигналами, называют аналоговыми, а устройства, работающие с дискретными сигналами, – цифровыми. Обычно в состав современных РЭС входят как аналоговые, так и цифровые устройства, в свою очередь включающие дискретные ЭРЭ – резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, полупроводниковые приборы (транзисторы, диоды, светодиоды и др.), а также узлы в интегральном исполнении (ИМС, БИС, СБИС и элементы функциональной микроэлектроники). В состав элементной базы РЭС входят также элементы электро монтажа – соединители, печатные платы, провода, шлейфы и кабели из объёмного провода.

Микросхемы являются основной элементной базой современных РЭС из-за своей миниатюрности и высокой надежности. Однако эксплуатационная надежность аппаратуры зависит также от качества разработки конструкции, уровня технологического процесса изготовления и качества использованных в аппаратуре других комплектующих изделий – электрорадиоэлементов (резисторов,

конденсаторов и др.), полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и т.д.), электрических соединителей.

В условиях промышленного производства применение комплектующих изделий регламентируется ведомственными ограничительными перечнями. Не допускается, в частности, применение таких компонентов, как германиевые диоды и транзисторы (все они сняты с производства и запрещены к применению в новых разработках в России), устаревшие и снятые с производства типы интегральных микросхем, транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов, реле и т.п.

Ниже приводится краткая сводка информационных материалов по наиболее употребительным видам комплектующих изделий РЭС [1].

1.3.1. Резисторы постоянные

При выборе типа резисторов руководствуются рядом требований к их электрическим, конструктивным характеристикам и эксплуатационным показателям:

- номинальное значение сопротивления;
- допустимая мощность рассеяния;
- класс точности – допустимая погрешность основного параметра;
- коэффициент температурной зависимости сопротивления;
- уровень собственных шумов;
- допустимое падение напряжения на резисторе;
- массогабаритные показатели;
- возможность формовки выводов для использования в печатном монтаже, в том числе возможность монтажа автоматами;
- показатели устойчивости к климатическим воздействиям;
- показатели устойчивости к механическим воздействиям;
- показатели надежности.

Массовым типом резисторов, применяемых в печатных узлах РЭС, являются постоянные металлодиэлектрические резисторы.

Шкалы номинальных значений основного параметра ЭРЭ, установленные государственным стандартом ГОСТ 2825-67, имеют обозначения: E6, E12, E24, E48, E96 и E192 (табл. 1.1). Наиболее массовым является ряд E24. Он характеризуется десятипроцентным приращением значения при переходе от номинала к номиналу и распространяется на компоненты классов точности $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$. Ряды E48, E96 и E192 характеризуются соответственно приращениями 5% , 2% и 1% и распространяются на прецизионные электрорадиокомпоненты. Ряды E6 и E12 распространяются на переменные резисторы. Эти же ряды номинальных значений распространяются на конденсаторы и катушки индуктивности.

Таблица 1.1

Ряды номинальных значений резисторов

Обозначение ряда	Ряд							
	E6	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	
E12	1,0	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8		
	1,2	1,6	2,7	3,9	5,6	8,2		
E24	1,0	1,3	1,8	2,4	3,6	4,7	6,2	8,2
	1,1	1,5	2,0	2,7	3,9	5,1	6,8	9,1
	1,2	1,6	2,2	3,3	4,3	5,6	7,5	10,0
E48	100	133	178	237	316	422	568	750
	105	140	187	249	332	442	590	787
	110	147	196	261	348	464	619	825
	115	154	205	274	365	487	649	866
	121	162	215	287	383	511	681	909
	127	169	226	301	402	536	715	953
E96	100	133	178	237	316	422	562	750
	102	137	182	243	324	432	576	768
	105	140	187	249	332	442	590	787
	107	143	196	255	340	453	604	806
	110	147	196	261	348	464	619	825
	113	150	200	267	357	475	634	845
	115	154	205	274	365	487	649	866
	118	158	210	280	374	499	665	887
	121	162	215	287	383	511	681	909
	124	165	221	294	392	523	698	931
	127	169	226	301	402	536	715	953
	130	174	232	309	412	549	732	976

Номинальное значение параметра (сопротивления) образуется путем умножения опорных значений из табл. 1.1 на масштабный коэффициент из ряда: 1, 10^3 , 10^6 , 10^9 и т.д. Производные от основной единицы сопротивления – ома в инженерной практике называются килоомами, мегаомами, гигаомами. При указании номинала резистора в конструкторской документации и в технической литературе используются обозначения: Ом, кОм, МОм, ГОм.

При выполнении индивидуальных заданий и для использования в дипломном проектировании могут быть рекомендованы следующие типы резисторов.

1. Резисторы С2-23 ОЖО.467.081 ТУ (рис.1.1).

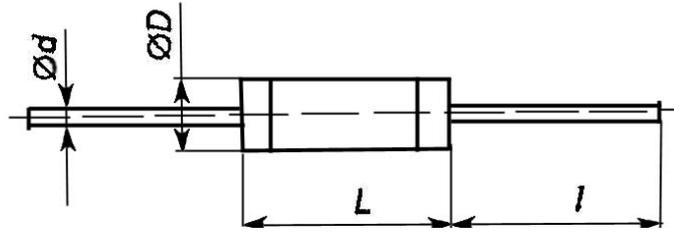


Рис.1.1. Резисторы постоянные металлодиэлектрические С2-23

Номинальные значения сопротивлений от 1 Ом до 10 МОм. Допустимая мощность рассеяния от 0,062 до 2,0 Вт (шесть типоразмеров по мощности).

Шкала номинальных значений по ГОСТ 2825-67: E96 – для классов точности $\pm 1\%$, $\pm 2\%$; E24 – для классов точности $\pm 5\%$, $\pm 10\%$. В табл. 1.2 приведены обозначения типоразмеров и сведения о габаритных размерах резисторов С2-23.

Таблица 1.2

Основные параметры резисторов С2-23

Типоразмер	$P_{\text{рас.}}$, Вт	L, мм	D, мм	d, мм	l, мм
C2-23-0.062	0,062	4,6	1,6	0,5	20
C2-23-0.125	0,125	6,0	2,0	0,5	20
C2-23-0.25	0,25	7,0	3,0	0,6	20
C2-23-0.5	0,5	10,8	4,2	0,8	25
C2-23-1	1,0	13,0	6,6	0,8	25
C2-23-2	2,0	18,5	8,8	1	25

2. Резисторы С2-33Н ОЖО.467.173 ТУ.

Выпускаются шести типоразмеров по величине допустимой мощности рассеяния – от 0,125 до 2 Вт, в вариантах исполнения для ручного и автоматического монтажа.

Номинальные значения сопротивлений от 1,0 Ом до 22 МОм.

Классы точности $\pm 1\%$, $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$.

Шкала номинальных значений для классов точности $\pm 1\%$, $\pm 2\%$ – E96, для классов точности $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ – E24 (ГОСТ 2825-67).

3. Прецизионные резисторы С2-29В ОЖО.467.009 ТУ.

Выпускаются в шести типоразмерах по величине допустимой мощности рассеяния – от 0,062 до 2 Вт.

Номинальные значения сопротивлений от 1 Ом до 20 МОм.

Классы точности $\pm 0,05\%$, $\pm 0,1\%$, $\pm 0,25\%$, $\pm 0,5\%$, $\pm 1\%$.

Шкала номинальных значений – E192 (ГОСТ 2825-67).

Показателем температурной зависимости сопротивления резистора является температурный коэффициент сопротивления (ТКС) – относительное изменение величины сопротивления при изменении его температуры на один градус по Цельсию (Кельвину).

В табл. 1.3 приведена классификация резисторов перечисленных типов по величине температурного коэффициента сопротивления.

Таблица 1.3

Классификация резисторов по величине ТКС

Тип	Группа ТКС	ТКС $\times 10^{-6}/K$	Диапазон температур	Диапазон номинальных значений	Класс точности
С2-23	В	± 300	$(-60...+20) ^\circ C$	1 Ом...9,1 МОм	$\pm 2 \%$, $\pm 5 \%$, $\pm 10 \%$
	Г	± 500		1 Ом...1 МОм	$\pm 2 \%$, $\pm 5 \%$, $\pm 10 \%$
	Д	± 800		1 Ом...10 МОм	$\pm 2 \%$, $\pm 5 \%$, $\pm 10 \%$
	Е	± 1200		1 Ом...10 МОм	$\pm 5 \%$, $\pm 10 \%$
	Е	± 150		10 Ом...1 МОм	$\pm 0,5 \%$, $\pm 1 \%$, $\pm 2 \%$
	Ж	± 75		33,2 Ом...15,8 кОм	$\pm 0,5 \%$, $\pm 1 \%$, $\pm 2 \%$
С2-29В	А	± 75	$(-60...+20) ^\circ C$	10 Ом...10 МОм	Все классы: 0,05 %, 0,1 % 0,25 %, 0,5 % 1 %
	Б	± 150		1 Ом...20 МОм	
	В	± 300		1 Ом...20 МОм	
	Д	± 5		$(+20...+70) ^\circ C$ 10 кОм...100 кОм	
	С	± 50		$(-60...+20) ^\circ C$ 101 Ом...100 кОм	
С2-33Н	Б	± 100	$(-60...+20) ^\circ C$	1 кОм...9,76 кОм	$\pm 0,5 \%$, $\pm 1 \%$, $\pm 2 \%$
	В	± 300		10 Ом...240 кОм	$\pm 1 \%$, $\pm 2 \%$, $\pm 5 \%$, $\pm 10 \%$
	Г	± 500		1 Ом...1 МОм	$\pm 2 \%$, $\pm 5 \%$, $\pm 10 \%$
	Д	± 500		1 Ом...1 МОм	$\pm 2 \%$, $\pm 5 \%$, $\pm 10 \%$
	Ж	± 1500		10 Ом...22 МОм	$\pm 5 \%$, $\pm 10 \%$

Уровень собственных шумов характеризуется величиной напряжения флуктуационной составляющей падения напряжения на резисторе (в микровольтах на один вольт падения напряжения).

Предельно допустимые эксплуатационные характеристики перечисленных типов резисторов практически одинаковы:

Диапазон температур:	$-60^\circ C...+155^\circ C$
Относительная влажность воздуха при $+35^\circ C$:	98 %
Пониженное атмосферное давление	$1,3 \cdot 10^{-4}$ Па
Повышенное атмосферное давление	$2,97 \cdot 10^5$ Па

В табл. 1.4 приведена классификация резисторов рассматриваемых типов на группы по уровню собственных шумов. Предельные рабочие напряжения резисторов представлены в табл. 1.5.

Таблица 1.4

Классификация резисторов по уровню собственных шумов

Тип резистора	Группа по уровню собственного шума	Пределы номинальных значений	Уровень собственного шума, мкВ/В, не более
С2-23	А	До 10 кОм	1
	А	Свыше 10 кОм	1
	Б		5
	Без обозначения		Не нормирован
С2-29В	Без обозначения	1 Ом...10 кОм	1
		10 кОм...499 кОм	0,5
			1
		499 кОм...10 МОм	1
			5
		Свыше 10 МОм	5
С2-33Н	А	0,1 Ом...10 кОм	1
		10 кОм...10 МОм	1
	Без обозначения	10 Ом...22 МОм	5

Таблица 1.5

Предельные рабочие напряжения резисторов

Тип	U _{пред} , В	P _{рас} , Вт					
		0,062	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0
С2-23	Постоянное, переменное	100	200	250	350	500	750
	Импульсное	150	350	450	750	1000	1200
С2-29В	Постоянное, переменное	150	200	350	500	750	750
	Импульсное	300	400	750	1000	1200	1200
С2-33Н	Постоянное, переменное	-	200	250	350	500	750
	Импульсное	-	400	450	750	1000	1200

Допустимые параметры механических воздействий для рассмотренных выше типов резисторов следующие:

Максимальная частота синусоидальной вибрации

5000 Гц

Пиковое ускорение одиночного удара

10000 м/с² (1000 g)

Пиковое ускорение многократного удара 1500 м/с² (150 g)

Максимальная резонансная частота: 5000 Гц

Показатели надежности рассматриваемых здесь типов резисторов сведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6

Показатели надежности резисторов

Тип резистора	C2-23	C2-29B	C2-33H
Интенсивность отказов, 1/ч	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$
Гарантированная наработка, ч	50000	25000	20000
Срок сохраняемости, лет	25	25	15

На примере записи в конструкторской документации покажем, в каком порядке указывается информация о резисторе:



1.3.2. Резисторы переменные

Резисторы с регулируемой величиной сопротивления называются *переменными резисторами*. По видам осуществляемых регулировок переменные резисторы подразделяются на регулировочные и подстроенные. Регулировочные переменные резисторы предназначены для осуществления оперативных регулировок в процессе эксплуатации РЭС. Подстроечные переменные резисторы предназначены для осуществления регулировок эпизодически, при наладке узлов и блоков РЭС.

В табл. 1.7 приведена сводка данных для нескольких типов переменных резисторов, предназначенных для печатного монтажа.

Таблица 1.7

Переменные резисторы для печатного монтажа

Параметры	Тип резистора			
	СПЗ-19Б	РП1-84	РП1-61А	РП1-63ВМ
1	2	3	4	5
<i>Конструктивные характеристики</i>				
Габариты, мм	7,5x6,5x9	10x6,3x10	10x4,5x12,2	10x4x10,6
Шаг выводов, мм	2,5	2,5	2,5	5
Масса, г	0,8	3	1	1,5
Износоустойчивость, циклов	500	15000	200	500
<i>Электрические характеристики</i>				
Диапазон номинальных значений, Ом	10... 1·10 ⁶	470...4.7·10 ⁶	100...6,8·10 ⁶	47... 1·10 ⁶
Класс точности, %	10...20	20... 30	20...30	10...20
Номинальная мощность рассеяния, Вт	0,5	0,025	0,5	0,125
Температура при номинальной мощности, °С	70	55	70	40
ТКС (по модулю), (1/К) x 10 ⁻⁶	250...500	1000	100...250	1000...1500
Уровень собственных шумов, мкВ/В	20	5...30	20	20
Сопротивление изоляции, МОм	1000	1000	-	100
Начальный скачок, %	15	10	15	10
<i>Эксплуатационные характеристики</i>				
Диапазон рабочих температур, °С	-60...+125	-60...+70		-60...+125
Коэффициент снижения мощности при максимальной температуре	0,1	0,2	-	0,4

Окончание табл. 1.7

1	2	3	4	5
Относительная влажность при 25 °С, %	98			
Предельное напряжение постоянного и переменного тока, В	150	50	250	150
Предельное напряжение импульсное, В	210	–	350	150
Максимальная частота синусоидальной вибрации, Гц	5000	80	80	80
Однократный удар: пиковое ускорение, м/с ² длительность импульса, мс	10000 0,1...2,0	– –	– –	– –
Многократные удары: пиковое ускорение, м/с ² длительность импульса 1...5 мс	1500	150	150	150
Максимальная резонансная частота, Гц	100	100	100	80
Показатели надежности				
Интенсивность отказов, 1/ч	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$
Гарантированная наработка, ч	20000	20000	20000	15000
Срок сохраняемости, лет	15	12	15	10

Ряд номинальных значений всех перечисленных типов переменных резисторов – Е6 по ГОСТ 2875-67.

Выбор типа переменного резистора должен делаться из условий поставленной задачи с учетом всех приведенных в табл. 1.7 и ряда дополнительных показателей.

Одним из важных свойств переменного резистора является его функциональная характеристика – закон изменения сопротивления между выводом, соединенным с подвижной контактной щеткой и одним из крайних выводов резистора от угла поворота или продольного перемещения подвижной системы.

Регулируемые резисторы выпускаются с тремя видами функциональной характеристики:

«А» – с линейной зависимостью сопротивления от угла поворота;

«Б» – с зависимостью, близкой к логарифмической;

«В» – с зависимостью в виде показательной функции.

Переменные резисторы с функциональной характеристикой «В» применяются в регуляторах громкости радиовещательных приемников и звуковоспроизводящей аппаратуры, чтобы скомпенсировать логарифмическую динамическую характеристику человеческого слуха и обеспечить возможность изменения громкости звучания пропорционально углу поворота или продольному перемещению подвижной системы регулятора, в особенности при малых уровнях громкости.

Переменные резисторы с функциональной характеристикой «Б» применяются в узлах управления формой частотной характеристики (регулировки тембра) звуковоспроизводящей аппаратуры.

К подстроечным резисторам требования нелинейной функциональной характеристики не предъявляются, и они выпускаются с характеристикой «А».

Следует иметь в виду, что наличие подстроечных переменных резисторов в узлах РЭС всегда нежелательно. Наличие их в печатных узлах РЭС приводит к увеличению габаритных размеров, предполагает необходимость обеспечения доступа к работающему узлу для выполнения подстройки, что часто усложняет конструкцию узлов и блоков и ухудшает условия их защиты от воздействия факторов внешней среды.

С точки зрения электрических характеристик подстроечные резисторы являются источниками дополнительного внутреннего шума, значительно превышающего внутренние шумы постоянных резисторов.

С точки зрения надежности подстроечные резисторы являются потенциальным источником отказов, связанных с превышением ресурса износоустойчивости, составляющего у разных типов всего от 100 до 500 полных циклов регулировки (поворотов подвижной системы). Поэтому следует проектировать высокостабильные аналоговые узлы, сохраняющие свои характеристики в течение всего срока их работы без подстройки.

Пример записи в конструкторской документации:

Резистор РП1-81-100 кОм ±20 % АШПК.434160.017 ТУ.

1.3.3. Конденсаторы постоянной емкости

При выборе типа и типоразмера конденсаторов набор требований, сформулированных по отношению к резисторам, несколько изменяется только в части электрических характеристик. Не повторяя всего набора, перечислим ряд показателей, специфических именно для конденсаторов:

номинальное рабочее напряжение (постоянного, переменного тока или импульсного);

частотный диапазон, в котором работает конденсатор;

тангенс угла диэлектрических потерь;

зависимость величины емкости от рабочего напряжения.

Большое разнообразие требований по номинальным значениям емкости – от единиц пикофард до тысяч микрофард, по рабочим напряжениям – от единиц до тысяч вольт, по классу точности, потерям, температурному коэффициенту емкости (ТКЕ) – все это определяет разнообразие типов и обилие типоразмеров конденсаторов.

Приведем выдержки из справочных материалов по некоторым типам конденсаторов, предназначенных для использования в печатных платах РЭС.

1. Конденсаторы с керамическим диэлектриком К10-17а (рис. 1.2, а).

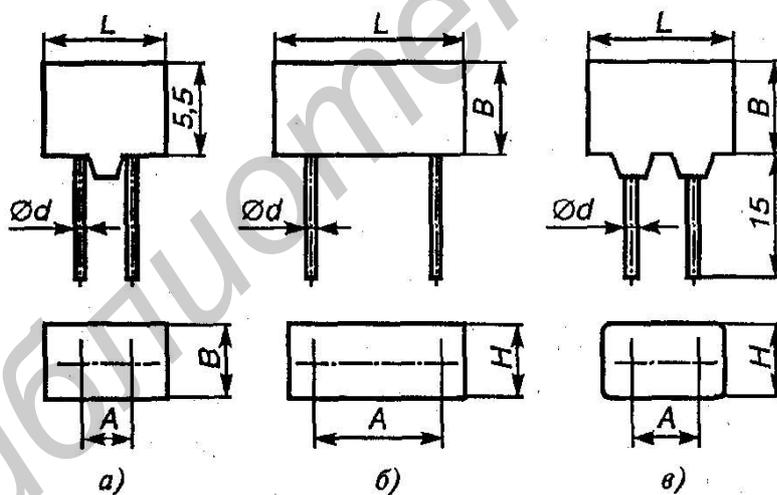


Рис. 1.2. Конденсаторы с керамическим диэлектриком: а – типа К10-17а; б – типа К10-47а; в – типа К10-476

Предназначены для применения во всех видах радиоаппаратуры в цепях постоянного и переменного тока в широком диапазоне частот.

Выпускаются в изолированном всеклиматическом исполнении (залиты обволакивающим компаундом) в трех типоразмерах (табл. 1.8).

Таблица 1.8

Типоразмеры конденсаторов К10-17а

Предельные номинальные значения емкости	L, мм	B, мм	A, мм	d, мм
2,2... 2000 пФ(гр. ПЗЗ и др.) 6,8 нФ... 0,47 мкФ (гр. Н90)	6,8	4,6	2,5	0,6
2,2 нФ (гр. ПЗЗ) ... 1,5 мкФ (гр. Н90)	8,4	6,7	5,0	0,6
6,2 нФ (гр. ПЗЗ)... 0,47 мкФ (гр. Н90)	12	8,6	7,5	0,6

Номинальные значения емкости от 2,2 пФ до 1,5 мкФ (шкала E24).

Группы по ТКЕ: ПЗЗ, М47, М750, М1500, Н50 и Н90.

Классы точности: (+80...-20) % для группы ТКЕ Н90; $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ для остальных групп.

Номинальные рабочие напряжения от 25 до 160 В.

Пример записи в конструкторской документации:

Конденсатор К10-17а – М47 – 430 нФ $\pm 10\%$ – В – ОЖО. 460.107 ТУ.

2. Керамические конденсаторы К10-47а, К10-47б (рис. 1, 2, б, в).

Предназначены для применения в цепях постоянного, переменного и пульсирующего тока в широком диапазоне частот.

Номинальные значения емкости от 10 нФ до 2,2 мкФ.

Группы по ТКЕ: Н30, Н50, Н90.

Классы точности: (+80...-20) % для группы Н90; $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ для остальных групп ТКЕ.

Номинальные рабочие напряжения 50, 100 и 250 В. Следует иметь в виду, что в качестве диэлектрика в конденсаторах данного типа использована сегнетокерамика, вследствие чего номинальное значение емкости реализуется только при рабочих напряжениях, близких к номинальным.

В табл. 1.9 приведены конструктивные данные конденсаторов К10-47, в исполнении «а» и «б» температурной группы Н30: «а» – в пластмассовом корпусе, «б» – залиты обволакивающим компаундом.

Таблица 1.9

Конструктивные данные конденсаторов К10-47

Пределы номинальных значений емкости	U _{ном} , В	L, мм	H, мм	B, мм	A, мм	d, мм
1	2	3	4	5	6	7
Исполнение «а», группа ТКЕ Н30						
10 нФ... 33 нФ	100	7,5	5,3	5	5	0,6
47 нФ, 68 нФ		9	5,3	7,1	5	0,6

0,1 мкФ, 0,15 мкФ	12	5,3	9,5	7,5	0,8
0,22 мкФ, 0,33 мкФ	14	5,3	11	10	0,8

Окончание табл. 1.9

1	2	3	4	5	6	7
0,47 мкФ, 0,68 мкФ	100	16	5,3	13,5	12,5	0,8
10 нФ, 15 нФ	250	9	5,3	7,1	5	0,6
22 нФ, 33 нФ, 47 нФ		12	5,3	9,5	7,5	0,8
0,068 мкФ		14	5,3	11	10	0,8
0,1 мкФ		16	5,3	13,5	12,5	0,8
Исполнение «б», группа ТКЕ НЗО						
10 нФ...33 нФ	100	7,5	5,3	5	5	0,6
47 нФ, 68 нФ	100	9	5,3	7,1	5	0,6
10 нФ, 15 нФ	250	9	5,3	7,1	5	0,6

Пример записи в конструкторской документации:

Конденсатор К10-47 а – 100 В – 0,22 мкФ ± 20 % НЗО ОЖО.460.174 ТУ.

Сводка данных по электрическим параметрам, эксплуатационным показателям, показателям надежности рассматриваемых здесь типов керамических конденсаторов приведена в табл. 1.10.

Таблица 1.10

Параметры керамических конденсаторов

Параметры	Тип конденсатора		
	К10-17а	К10-47а	К15-206
1	2	3	4
<i>Электрические параметры</i>			
Номинальное напряжение, В	25...160	50,100,250	1600...4000
Допуск, %	Н90(+80...-20) Н50 (+50...-20) Остальные группы ±5, ±10, ±20	НЗО ±20 Н90 (+80...-20)	Н50 (+50... -20)
Тангенс угла потерь	0,0015 при С > 50 пФ	0,0015 при С > 50 пФ	0,035
Сопротивление изоляции, МОм	10000	4000	10000
<i>Устойчивость к воздействиям факторов окружающей среды</i>			
Температура, °С	-60...+125	-60...+125	-60...+85
Атмосферное давление: пониженное повышенное	1,3·10 ⁻⁴ 2,97·10 ⁵	1,3·10 ⁻⁴ 2,97·10 ⁵	1,3·10 ⁻⁴ 2,97·10 ⁵
Относительная влажность при 25°С	98 %	98 %	80 %

Соляной туман	Устойчив	Устойчив в исполнении «В»	Устойчив
---------------	----------	---------------------------	----------

Окончание табл. 1.10

1	2	3	4
Иней, роса	Устойчив	Устойчив в исполнении «В»	-
Плесневые грибы	Устойчив	Устойчив в исполнении «В»	-
Синусоидальная вибрация, Гц	-	80 (5000)*	50... 10000
Ускорение, м/с ²	-	50 (400)*	400
Акустический шум, дБ, в диапазоне 50... 10000 Гц	-	170	170
Однократный удар, м/с ²	-	5000(15000)*	15000
Многократные удары, м/с ²	-	400(1500)*	1500
Линейное ускорение, м/с ²	-	5000*	5000
<i>Показатели надежности</i>			
Минимальная наработка, ч	25000	30000	2000
Срок сохраняемости, лет	25	20... 25	20

* При креплении конденсатора за корпус.

3. Конденсаторы металлопленочные полиэтилентерефталатные (ЛАВСАН) К73-24 (рис. 1.3).

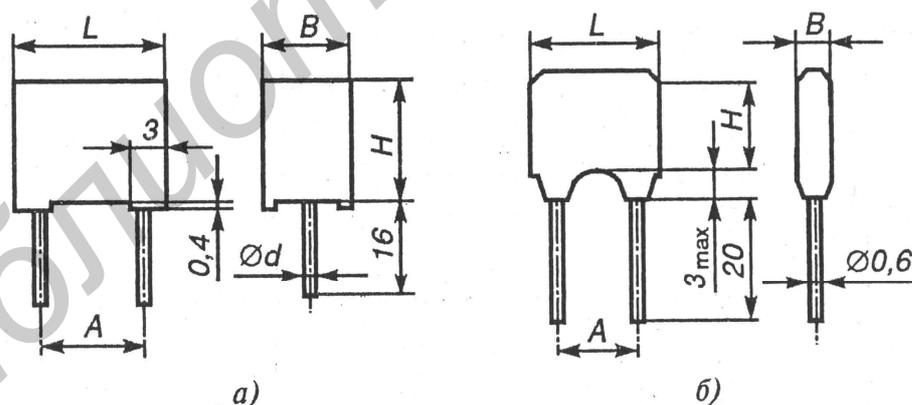


Рис. 1.3. Конденсаторы металлопленочные полиэтилентерефталатные: а – типа К73-24; б – типа К73-24в

Предназначены для работы в качестве встроенных элементов внутреннего монтажа аппаратуры в цепях постоянного, переменного и пульсирующего тока.

Конденсаторы изготавливаются в трех вариантах: «а», «б» и «в».

Конденсаторы варианта «а» – уплотненные (рис. 1.3, а), варианта «б» – незащищенные, варианта «в» – защищенные компаундом (рис. 1.3, б).

В табл. 1.11 приведены сведения о номенклатуре номинальных значений емкости, рабочих напряжений и габаритных размеров конденсаторов К73-24в.

Таблица 1.11

Параметры конденсаторов К73-24в

C _{НОМ} , мкФ	U _{НОМ} =100 В				U _{НОМ} =250 В					
	L, мм	H, мм	B, мм	A, мм	L, мм	H, мм	B, мм	A, мм		
0,001	11	9	4,5	7,5	11	9	4,5	7,5		
0,0015										
0,0022										
0,0033										
0,0047										
0,0068										
0,0082										
0,01		10,5			10,5	4,5	13		11,5	7,5
0,012										
0,015										
0,022										
0,027										
0,033										
0,039										
0,047										
0,056										
0,068										
0,082										
0,1	13	11,5	6,0	10	16	7,5				
0,12										
0,15										
0,18										
0,22										
0,27										
0,33										
0,39										
0,47	13,5	11,5	6,6	19,5	16	8,2				
0,56										
0,68										
0,82										
1,0	19,5	16	6,7	15	19	11,2				
0,68										
0,82	19,5	16	5,6	15	19	8,8				
1,0										
1,0	19,5	16	6,7	15	27	10,5	22,5			
1,0										

Пример записи в конструкторской документации:

Конденсатор К73-24в – 700 В – 0,1 мкФ – ± 10 % АДПК. 673633.010 ТУ.

4. Конденсаторы металлопленочные полиэтилентерфталатные К73-39.

Заменяют: металлопленочные конденсаторы К73-17, К73-30, К73-34, керамические конденсаторы КМЗ «б» – КМ6 «б», К10-17 «б», К10-47 «а» групп НЗО, Н50, Н90, превосходя их по стабильности емкости.

Основные технические данные металлопленочных конденсаторов двух рассматриваемых здесь типов приведены в табл. 1.12.

Таблица 1.12
Технические данные металлопленочных конденсаторов

Параметры	Тип конденсатора	
	К73-24в	К73-39
<i>Электрические параметры</i>		
Номинальная емкость	0,001... 6,8 мкФ	0,001... 1,0 мкФ
Номинальное напряжение (в интервале температур -60 °С ... +85 °С), В	100, 250	63, 100, 250, 400, 630
Класс точности	±5; ±10; ±20	±5; ±10; ±20
Тангенс угла потерь при $f = 1$ кГц	≤ 0,012	≤ 0,012
Сопротивление изоляции для $C_{ном} \leq 0,033$ мкФ, МОм, не менее	3000	3000
Сопротивление изоляции между соединенными выводами и корпусом, МОм, не менее	10000	-
Постоянная времени для $C_{ном} \geq 0,033$ мкФ, МОм·мкФ	≥ 1000	≥ 1000
<i>Эксплуатационные</i>		
Интервал рабочих температур	-60...+100 °С	-60... +100 °С
Относительная влажность при 25 °С	98%	98 %
Пониженное атмосферное давление, Па	$6,66 \cdot 10^2$	-
Синусоидальная вибрация: диапазон частот, Гц амплитуда ускорения, м/с ²	1...80 50	- -
Пиковое ускорение многократного удара, м/с ²	150	-
<i>Показатели надежности</i>		
Интенсивность отказов, 1/ч	$2 \cdot 10^{-8}$	-
Минимальная наработка, ч	15000	15000

Срок сохраняемости, лет	10	10
-------------------------	----	----

Пример записи в конструкторской документации:

Конденсатор К73-39 – 100 В – 0,1 мкФ ± 10 % РАЯЦ. 673633.000 ТУ.

5. Оксидно-электролитические конденсаторы К50-35 (рис. 1.4, а).

Предназначены для применения в цепях постоянного и пульсирующего тока для фильтрации помех. Выпускаются в цилиндрическом алюминиевом корпусе (исполнение «И» – в полихлорвиниловой оболочке). Диаметр корпуса: 6,3 и 8 мм (диаметр выводов 0,6 мм, шаг 2,5 мм); 10, 14 и 16 мм (диаметр выводов 0,8 мм, шаг 5 мм); 18 и 21 мм (диаметр выводов 0,8 мм, шаг 7,5 мм).

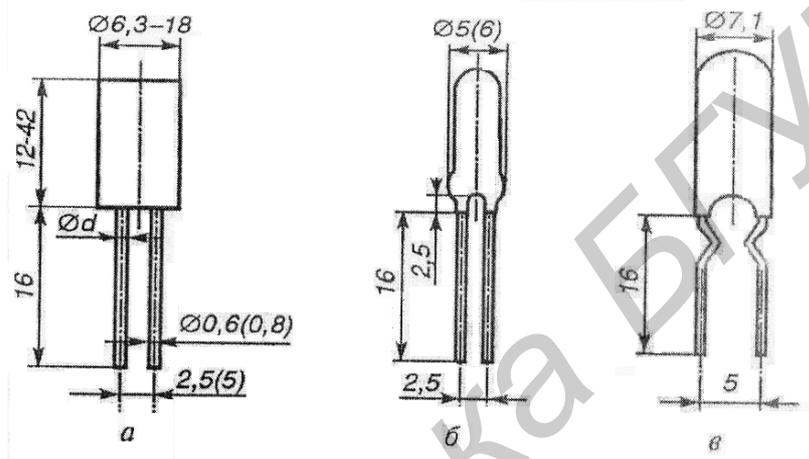


Рис 1.4. Конденсаторы:

- а – оксидно-электролитические типа К50-35;
- б, в – оксидно-полупроводниковые типа К53-34

Номинальные рабочие напряжения 6,3 ...315 В.

Номинальные значения емкости 1,0 ... 4700 мкФ.

Пример записи в конструкторской документации:

Конденсатор К50-35 – 25 В -47 мкФ – И-В-А ОЖО. 464.214 ТУ.

6. Конденсаторы оксидно-полупроводниковые К53-34 (рис. 1.4, б, в).

Конденсаторы неполярные. Предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего тока.

Выпускаются в изолированном всеклиматическом исполнении в двух вариантах: К53-34-1 (рис. 1.4, б) – 2 типоразмера (Ø5 и 6 мм) и К53-34-2 (рис. 1.4, в) – 3 типоразмера (Ø 5, 6 и 7,1 мм).

Шаг расположения выводов 2,5 и 5 мм (рис. 1.4, б, в).

Номинальное рабочее напряжение от 1,6 до 50 В.

Номинальные значения емкости от 6,8 до 100 мкФ, шкала Е6.

Пример записи в конструкторской документации:

Конденсатор К53-34-1 – 6,3 В – 10мкФ ± 20 % – В ОЖО.464.238 ТУ.

7. Конденсаторы оксидно-электролитические неполярные К50-51.

Предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего тока и в импульсных режимах.

Выпускаются в цилиндрическом алюминиевом корпусе, одного типоразмера: диаметр корпуса 6 мм, высота 11 мм, диаметр выводов 0,6 мм, шаг 2,5 мм.

Номинальные рабочие напряжения 6; 3; 16, 25 и 50 В.

Номинальные значения емкости 2,2; 4,7; 10; 22 и 47 мкФ.

Пример записи в конструкторской документации:

Конденсатор К50-51 – 25В – 47мкФ – И-В:А АДПК.673541.000 ТУ.

8. Конденсаторы оксидно-полупроводниковые ниобиевые, полярные К53-21.

Предназначены для работы в цепях постоянного и пульсирующего тока и в импульсных режимах. Выпускаются в «уплотненном» исполнении в пластмассовом корпусе одного типоразмера (рис. 1.5).

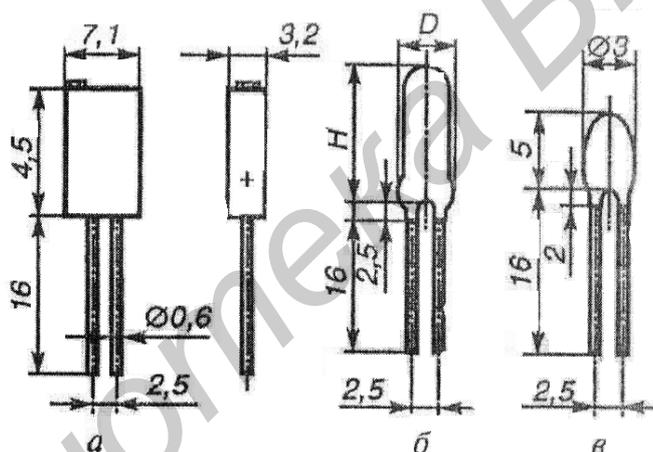


Рис. 1.5. Конденсаторы оксидно-полупроводниковые ниобиевые, полярные: а – типа К53-21; б, в – типа К53-30

Номинальные рабочие напряжения 6,3; 10; 16; 20 и 32 В.

Номинальные значения емкости 0,68 ... 4,7 мкФ, шкала Е6.

Класс точности $\pm 20\%$.

Пример записи в конструкторской документации:

Конденсатор К53-21 – 20 В – 47мкФ $\pm 20\%$ – А ОЖО.464.157 ТУ.

9. Конденсаторы оксидно-полупроводниковые ниобиевые, полярные К53-30.

Выпускаются в изолированном всеклиматическом исполнении и в исполнении УХЛ, в двух модификациях (рис. 1.5, б, в).

Номинальные рабочие напряжения 1,6... 32 В.

Номинальные значения емкости 1,0... 15 мкФ.

Обозначение документа на применение: ОЖО.464.279 ТУ для модификации 1 (рис. 1.5, б) ОЖО.464.225 ТУ – для модификации 2 (рис. 1.5, в).

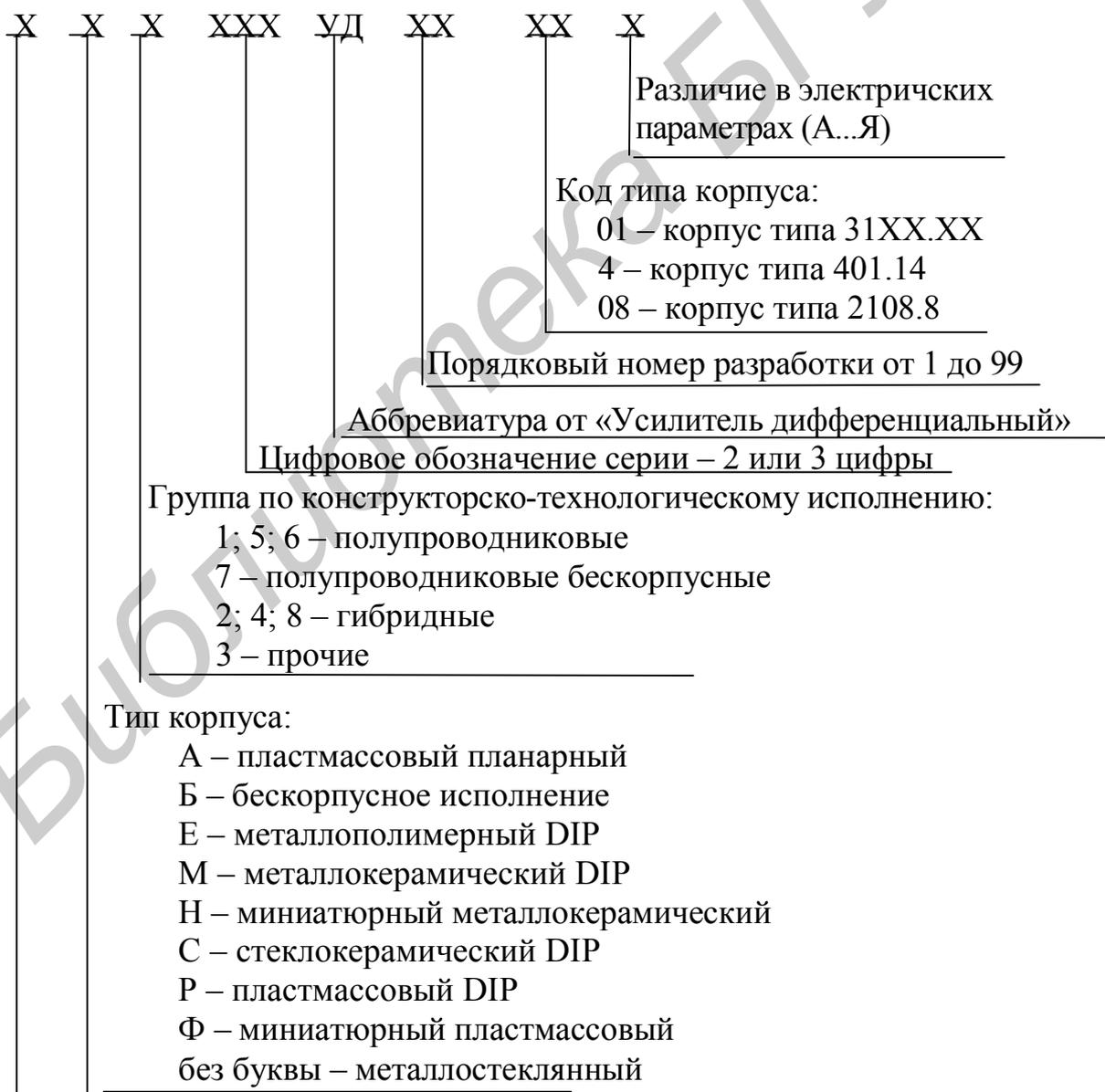
Пример записи в конструкторской документации:

Конденсатор К53-30-1 – 1,6 В – 47 мкФ ± 20 % – В – А ОЖО.464.279 ТУ.

1.3.4. Интегральные микросхемы

Выбор серии и конкретных типов микросхем основывается на знании их электрических параметров и эксплуатационных показателей. Операционный усилитель (ОУ), исполненный в виде интегральной микросхемы, используется в технике записи и воспроизведения звука, в технике телекоммуникаций, радиопередачи и радиоприема, в телевидении – для усиления, сравнения, фильтрации, генерирования сигналов и т.п.

Для обозначения микросхем операционных усилителей, производимых в России, принята следующая кодировка.



Вариант применения:

К – широкого применения

ОС – специального применения

Э – экспортное исполнение (шаг 2,54 и 1,27 мм)

нет символа – специального применения

Примеры обозначения: 140УД1А; КР140УД608; КФ1053УД3 и т.п.

По электрическим характеристикам ОУ подразделяются на следующие классы:

ОУ общего применения;

высоковольтные и мощные ОУ;

микромощные ОУ;

быстродействующие широкополосные ОУ;

прецизионные (высокоточные) ОУ;

многоканальные ОУ.

В табл. 1.13 приводится сводка необходимых конструктору сведений по ОУ широко распространенной серии 140.

Таблица 1.13

Операционные усилители серии 140

Тип ОУ	Классификационный тип	Тип корпуса	Технические условия
140УД1	Общего применения	301.12-1	6К0.347.004ТУ
КР140УД1	Общего применения	201.14-1	6К0.348.454 ТУ
140УД5	Быстродействующий	301.12-1	6К0.347.004 ТУ3
КР140УД5	Быстродействующий	201.14-1	6К0.348.239 ТУ
140УД6	Общего применения	301.8-2	6К0.347.004 ТУ4
КР140УД6	Общего применения	201.14-1	
140УД7	Общего применения	301.8-2	6К0.347.004 ТУ5
КР140УД7	Общего применения	201.14-1	
140УД8	Общего применения	301.8-1	6К0.347.027 ТУ
КР140УД8	Общего применения	2101.8-1	6К0.348.150 ТУ
140УД9	Общего применения	301.12-1	6К0.347.004 ТУ9
КР140УД9	Общего применения	2101.8-1	6К0.348.488 ТУ
140УД11	Быстродействующий	301.8-2	6К0.347.004ТУ15
140УД12	Микромощный	301.8-2	6К0.347.004 ТУ10
КР140УД12	Микромощный	201.14-1	
140УД13	Прецизионный	301.8-2	6К0.347.004 ТУ12
КР140УД14	Микромощный	201.14-1	6К0.348.304 ТУ
140УД14	Микромощный	301.8-2	6К0.347.004 ТУ11

К140УД16	Общего применения	301.8-2	6К0.348.669 ТУ
140УД17	Прецизионный	301.8-2	6К0.347.004 ТУ17
КР140УД18	Общего применения	2101.8-1	6К0.348.095-11 ТУ
140УД20	Двухканальный	201.14-10	6К0.347.004 ТУ14
К140УД22	Общего применения	301.8-2	6К0.348.095-13 ТУ

По условиям эксплуатации в рамках серии 140 выпускаются конструктивные исполнения микросхем, предназначенные для применения в аппаратуре как общепромышленного, так и специального назначения. Соответствующие разновидности микросхем выполняются в пластмассовых или металлокерамических *DIP*-корпусах или в круглых металлокерамических корпусах со штыревыми выводами.

В табл. 1.14 приведена сводка эксплуатационных показателей интегральных схем ОУ данной серии.

Таблица 1.14

Эксплуатационные показатели ОУ серии 140

Показатели	Серия, модификация				
	140	Н140	К140	КР140	КФ140
1	2	3	4	5	6
<i>Устойчивость к внешним воздействиям</i>					
Температурный диапазон, °С	-60...+125	-60...+85	-10...+70	-10...+70	-10...+70
Атмосферное давление, Па:					
пониженное	$6,67 \cdot 10^2$	$6,67 \cdot 10^2$	$26,6 \cdot 10^4$	$26,6 \cdot 10^4$	$26,6 \cdot 10^4$
повышенное	$2,97 \cdot 10^5$	$2,97 \cdot 10^5$	$2,97 \cdot 10^5$	$2,97 \cdot 10^5$	$2,97 \cdot 10^5$
Синусоидальная вибрация:					
диапазон частот, Гц	1...5000	1...5000	1...2000	1...2000	1...500
ускорение, м/с ²	400	400	200	200	100
Однократный удар:					
пиковое ускорение, м/с ²	15000	15000	1500	1500	1500
длительность импульса, мс	(0,1...2,0)	(0,1...2,0)	(0,1...2,0)	(0,1...2,0)	(0,1...2,0)
Многократные удары:					
пиковое ускорение, м/с ²	1500	1500	750...1500	1500	750
длительность импульса, мс	(1...5)	(1...5)	(1...6)	(1...5)	(1...6)
Линейное ускорение, м/с ²	5000	5000	5000	5000	500

Акустический шум: диапазон частот, Гц интенсивность, дБ	50...1000 0 170	-	-	-	-
Относительная влаж- ность при 35 °С	-	-	98 %	98 %	98 %
Иней и роса	Устойчив	Устойчив	-	-	-
Соляной туман	Устойчив	Устойчив	-	-	-

Окончание табл. 1.14

1	2	3	4	5	6
Плесневые грибы	Устойчив	Устойчив	-	-	-
<i>Показатели надежности</i>					
Средняя наработка до от- каза, ч	50000	50000	50000	15000	20000
Срок сохраняемости, лет	25	20	10	12	10

В современных РЭС и ЭВС используются различные виды интегральных логических микросхем – серии быстродействующих микросхем на эмиттерно-связанной логике (ЭСЛ-серии 100, 500 и др.), серии микросхем транзистор-транзисторной логики (ТТЛ-серии 133, К113, К155, 1533, К1533, К555 и др.), серии микросхем на комплементарных МДП-структурах (КМДП-серии К176, 564, К561), серии микросхем памяти К537, К556, К565, К573 и другие, микро-процессорные комплекты и однокристалльные микроЭВМ – серии К580, К1801, К1810, К1816 и другие, серии микросхем аналого-цифровых и цифроаналого-вых преобразователей К572, К1110 и т.д.

Среди них встречаются серии-двойники, являющиеся полными схемотехническими аналогами и аналогами по типам корпусов и цоколевке. Это объясняется тем, что с совершенствованием технологии оказалось возможным продублировать хорошо зарекомендовавшие себя и нашедшие широкое применение серии микросхем новыми сериями с более высокими техническими характеристиками, обеспечив возможность легкой замены устаревших микросхем новыми в уже разработанных узлах РЭС. Так, включение диодов Шоттки в структуру базового элемента ТТЛ-серий привело к созданию микросхем с меньшим энергопотреблением, появление «охранного кольца» в структуре КМДП привело к разработке на смену серии К176 ИМС серий 564, К561, К1564, работающих в широком диапазоне напряжений питания – от +3 до +15 В.

Существующие при этом «старые» серии 133, К155, К176 и другие будут выпускаться еще долго, так как сроки разработки, производства и эксплуатации РЭС на объектах установки обычно растягиваются на десятки лет, а модернизация, включающая замену электронного оборудования на более современное, стоит дорого и практикуется редко. Поэтому выпуск устаревших серий ИМС, необходимых для комплектования запасного имущества и принадлежностей (ЗИП) для ремонта находящихся в эксплуатации РЭС старых выпусков, про-

должается долгие годы. Применение устаревшей компонентной базы в новых разработках при этом ограничивается специальными ведомственными и межведомственными документами. Порядок применения покупных изделий, включая оформление разрешения на применение, регламентируется ГОСТ 2.124-85.

При выборе серии логических ИМС для РЭС (ЭВС) следует, как всегда, исходить из условий задачи по быстродействию проектируемого цифрового устройства, совместимости его по уровням напряжений входных и выходных сигналов, входным и выходным токам с другими узлами и блоками комплекса РЭС объекта, наличия или отсутствия на объекте установки ограничений по энергопотреблению, массогабаритным показателям, из условий эксплуатации устройства на объекте.

В табл. 1.15 приводится сводка данных по устойчивости микросхем к воздействиям окружающей среды. Следует отметить, что эти данные мало отличаются от данных табл. 1.14, поскольку устойчивость микросхем любых типов, как аналоговых, так и цифровых, к внешним воздействиям определяется в основном защитными свойствами корпуса. Это не касается только такого не рассматриваемого здесь показателя, как устойчивость к воздействию проникающей радиации, которая зависит от схемотехники и технологии производства ИМС.

Таблица 1.15

Эксплуатационные показатели некоторых серий логических микросхем

Показатель	Серия				
	133	1533	K555	564	KC561
1	2	3	4	5	6
<i>Эксплуатационные показатели</i>					
Вибрация: диапазон частот, Гц ускорение, м/с ²	1...5000 400	1...5000 400	1...2000 200	1...5000 400	1...2000 200
Многokратные удары: ускорение, м/с ² при длительности импульса, мс	1500 1...3	1500 1...5	1500 1...5	1500 1...3	1500 1...5
Однократный удар: ускорение, м/с ² при длительности импульса, мс	10000 0,2...1,0	15000 0,1...1,0	1500 0,1...2,0	10000 0,2...1,0	1500 0,1...2,0
Линейное ускорение, м/с ²	1500	5000	5000	5000	5000
Акустический шум: диапазон частот, Гц; интенсивность, дБ	-	50...10000 170	-	-	-

Атмосферное давление, Па: пониженное повышенное,	$0,67 \cdot 10^3$ $2,94 \cdot 10^5$	$0,67 \cdot 10^3$ $2,94 \cdot 10^5$	$2,66 \cdot 10^4$ $2,94 \cdot 10^5$	-	-
Температура, °С	-60...+125	-60...+125	-10...+70	-60...+125	-45...+100
Относительная влажность при 35°С, %	98	-	-	98	-

Окончание табл. 1.15

1	2	3	4	5	6
Иней, роса	Устойчи- вы	Устойчи- вы	-	Устойчи- вы	-
Соляной туман	-	-	-	-	-
Плесневые грибы	-	-	-	-	-
<i>Показатели надежности</i>					
Минимальная наработка, ч	50000	100000	50000	15000	50000
Срок сохраняемости, лет	15	25	12	15	15

Обозначение документов на поставку микросхем (технические условия), как правило, включает, кроме номера технических условий (ТУ) на серию в целом, еще и дополнительный номер исполнения на каждую микросхему внутри серии. Записи в конструкторской документации и при заказе поставки должны включать слово «микросхема», наименование микросхемы и обозначение документа на поставку, например:

Микросхема 1533ТМ5 6К0.347.364-17 ТУ.

1.3.5. Транзисторы и диоды

Основные признаки, по которым проводится классификация транзисторов, следующие.

По принципу управления током транзисторы подразделяются на биполярные и полевые.

Биполярные по типу комбинации проводимостей структуры делятся на транзисторы *p-n-p*- и *n-p-n*-типа.

Полевые транзисторы по типу проводимости канала делятся на транзисторы с *p*-каналом и *n*-каналом.

По способу получения проводящего канала полевые транзисторы делятся на транзисторы с управляющим *p-n*-переходом и МДП-транзисторы.

МДП-транзисторы делятся на транзисторы со встроенным и с индуцированным каналом.

Внутри каждого из перечисленных классов транзисторы делятся на приборы малой, средней и большой мощности, низкочастотные, высокочастотные, СВЧ-диапазона и импульсные.

Кроме этого, может быть проведено различие по используемым полупроводниковым материалам, по технологии создания структуры транзистора и т. п.

Номенклатура выпускаемых транзисторов и полупроводниковых диодов насчитывает тысячи позиций, поэтому полный обзор информации по их техническим характеристикам в данном пособии невозможен. Ограничимся подборкой данных по эксплуатационным показателям нескольких широко используемых типов кремниевых транзисторов (табл. 1.16).

Таблица 1.16

Эксплуатационные показатели некоторых типов транзисторов

Показатель	Тип транзистора				
	КТ316	2Т316	КТ601	2Т601	КТ819
<i>Эксплуатационные показатели</i>					
Вибрация: диапазон частот, Гц ускорение, м/с ²	1...5000 400	1...5000 400	1...2000 200	1...5000 400	1...2000 200
Многократные удары: ускорение, м/с ² длительность им- пульса, мс	1500 1...3	1500 1...5	1500 1...5	1500 1...3	1500 1...5
Однократный удар: ускорение, м/с ² длительность им- пульса, мс	10000 0,2...1,0	15000 0,1...1,0	1500 0,1...2,0	10000 0,2...1,0	1500 0,1...2,0
Линейное ускорение, м/с ²	1500	5000	5000	5000	5000
Атмосферное давление, Па: пониженное повышенное	0,67·10 ³ 2,94·10 ⁵	0,67·10 ³ 2,94·10 ⁵	2,66·10 ⁴ 2,94·10 ⁵	-	-
Температура, °С	-60...+125	-60...+125	-10...+70	-60...+125	-
Относительная влажность при 35 °С, %	98	-	-	98	-
<i>Показатели надежности</i>					
Минимальная наработка, ч	50000	100000	50000	15000	50000
Срок сохраняемости, лет	15	25	12	15	15

В табл. 1.16 представлена информация для транзисторов одного типа, но предназначенных для использования в РЭС общепромышленного и специального назначения (буква «К» или цифра 2 перед обозначением)

1.3.6. Электрические соединители

Применение электрических соединителей для присоединения модулей первого уровня (ячеек) вносит свои плюсы и минусы в технические характеристики разрабатываемых модулей и блоков РЭС.

Контакт металлических поверхностей между собой – сложное нелинейное явление. При соприкосновении металлических поверхностей электрический контакт имеет место не по всей поверхности, а только на выступающих зубцах шероховатостей. В результате локальные значения плотности тока могут намного превышать среднюю по всей площади контакта величину, вызывая локальный перегрев и окисление металла. Контактующие поверхности могут быть окисленными, а разрушение оксидной пленки – неравномерным по поверхности контакта. Переходное сопротивление электрического контакта зависит от физико-химической природы контактирующих металлов, от напряжения, под которым находится контакт, от протекающего тока. Разъемный электрический контакт подвержен влиянию таких внешних факторов, как температура, атмосферное давление, влажность воздуха. Возможна электролитическая коррозия. При неудачном подборе контактирующих металлов на контакте возникает контактная разность потенциалов. Поэтому главным минусом разъемных конструкций РЭС является потенциальное снижение надежности.

С другой стороны, плюсом разъемных конструкций являются их технологичность и ремонтпригодность. В разъемной конструкции возможно быстро заменить отказавший модуль, затем отремонтировать его, проверить на стенде и вернуть на место или в комплект запасных частей.

Таким образом, в основе выбора типа конструкции должен лежать компромисс между потенциальным снижением надежности и необходимостью обеспечения технологичности и ремонтпригодности проектируемых РЭС.

Принято считать, что изделия индивидуального и мелкосерийного производства, изделия, не нуждающиеся в оперативной замене отказавших модулей, изделия одноразового использования могут иметь неразъемную конструкцию.

Изделия же крупносерийного и массового производства, комплектуемые модулями, поступающими от разных производителей, изделия, по условиям использования которых требуется оперативная замена модулей в случае отказа, предпочтительно изготавливать в виде разъемных конструкций.

Известно множество конструкций электрических соединителей. По конструкции контакта все это множество может быть сведено к трем разновидностям: контакты, работающие «на прижим», ножевые контакты (плоский контакт-нож вдвигается в пружинящие губки розетки) и штыревые контакты (штырь круглого сечения входит в упругое разрезное или подпружиненное гнездо).

В ячейках на печатных платах широко применяются «печатные» соединители: на одном из краев платы создается проводящий рисунок в виде контактных пластин (ламель), а плата обрезается таким образом, чтобы образовалась «вилка» соединителя. Другая часть соединителя – розетка выпускается в виде самостоятельного компонента и приобретает как комплектующее изделие. Несмотря на широкое распространение, такие соединители являются не самыми надежными.

Наиболее надежными являются соединители с «гиперболическими» контактами: контакты розетки выполняются в виде натянутых между двумя кольцами проволок-струн, образующих при взаимном развороте этих колец поверхность, известную под названием гиперболического параболоида. Штыри вилки надежно охватываются проволоками гнезда розетки со всех сторон, образуя низкоомный, высоконадежный контакт. Соединители данного вида имеют обозначение ГРПМ.

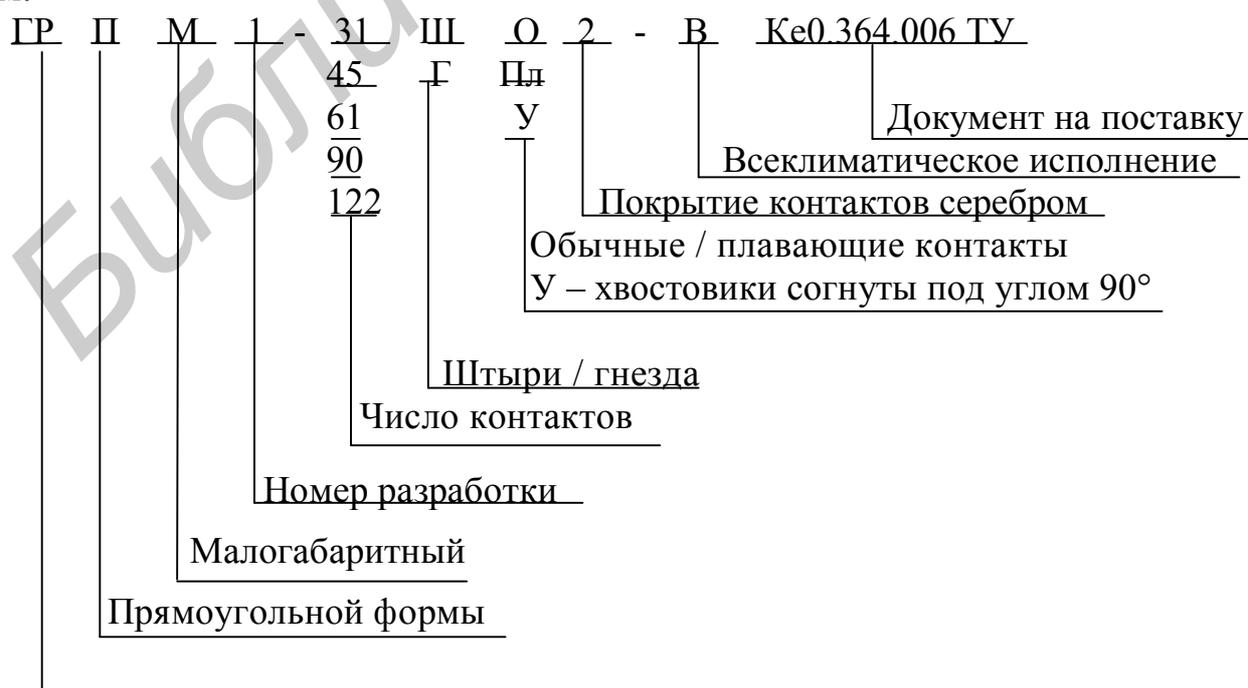
Выбор типа электрического соединителя делается с учетом его электрической нагрузки и допустимой плотности тока через контакты, вида тока, на который рассчитано применение соединителя, предельной частоты переменного тока, условий эксплуатации, надежности. При использовании базовых несущих конструкций (БНК) применение различных типов соединителей регламентируется государственным стандартом ГОСТ 26765.12-86.

Приведем краткую сводку данных на два типа соединителей для установки и монтажа на печатные платы базовых несущих конструкций БНК-1 РЭС по ГОСТ 26765.12-86.

1. Гиперболические соединители ГРПМ1.

Предназначены для работы в цепях постоянного и переменного тока с частотой до 3 МГц.

Обозначение соединителей ГРПМ1 расшифровывается следующим образом:



Гиперболический разъем

Геометрические размеры соединителей ГРПМ1 приводятся в табл.1.17.

Таблица 1.17

Геометрические размеры соединителей ГРПМ1

Количество контактов	A, мм	L, мм	N, мм	n, мм
31	68	78	52,5	15
45	92	102	77,0	22
61	120	130	105,0	30

Чертеж вилки соединителя ГРПМ1 показан на рис.1.6.

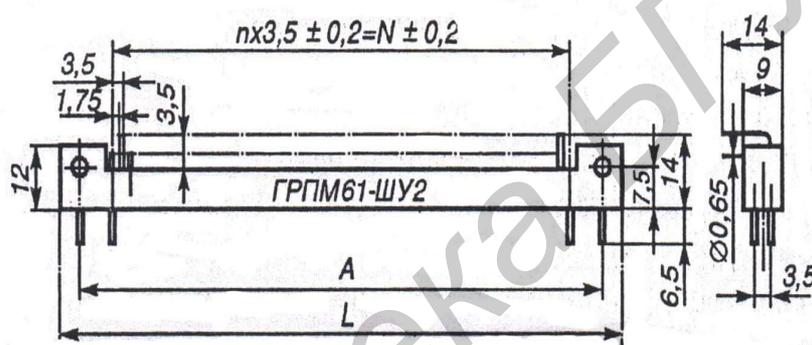


Рис. 1.6. Вилка электрического соединителя ГРПМ1

2. Соединители ножевые прямоугольной формы СНП34.

Предназначены для использования в цепях постоянного, переменного тока с частотой до 3 МГц и в импульсных режимах.

На печатную плату устанавливается розетка соединителя. Контакты располагаются в три ряда с шагом 2,5 мм вдоль и поперек колодки (рис. 1.7). Хвостовики контактов розетки изогнуты под углом 90° в сторону монтажных отверстий платы. Контакты покрыты золотом.

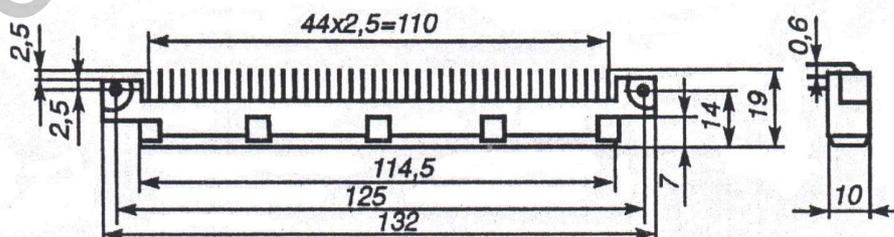


Рис. 1.7. Розетка электрического соединителя СНП34

Обозначение соединителей данного типа расшифровывается следующим образом:



Точное попадание штырей вилки в гнезда розетки при сочленении обеспечивается элементами конструкции соединителей и самой ячейки:

в корпус вилки ГРПМ1 запрессованы два штыря-ловителя разных диаметров, попадающие в гнезда розетки;

контакты вилки и розетки ГРПМ1 расположены в два ряда с неодинаковым числом контактов в ряду, в результате чего исключается возможность сочленения вилки, развернутой на 180° с розеткой;

на одной боковой стороне колодки розетки СНП34 выполнены углубления прямоугольной формы (видны на рис.1.7), в которые при сочленении входят «ответные» выступы на колодке вилки;

при сборке ячейки на плату устанавливается индивидуальная кодовая планка, исключая установку ячейки в «чужое» гнездо или в развернутом положении в модуль высшего уровня.

Данные по устойчивости соединителей ГРПМ1 и СНП34 к воздействиям факторов окружающей среды приводятся в табл.1.18.

Таблица 1.18

Эксплуатационные характеристики соединителей

Вид воздействия	Тип соединителя	
	ГРПМ1	СНП34
1	2	3
Температура окружающей среды (без учета перегрева контактов)	(-60...+85) °С	(-60...+85)°С
Относительная влажность воздуха при температуре +35 °С, %	98	98
Атмосферное давление, Па	1,07·10 ⁵ ...1,33·10 ⁻⁴	1,07·10 ⁵ ...1,33·10 ⁻⁴
Повышенное атмосферное давление, Па	2,97·10 ⁵	2,97·10 ⁵

Вибрация: диапазон частот, Гц ускорение, м/с ²	5...4000 300	1...3000 200
Множественные удары: ускорение, м/с ² длительность импульса, мс	350 1...80	400 2...10
Однократный удар: ускорение, м/с ² длительность импульса, мс	1500 0,2...1,0	5000 1,0...2,0
Линейное ускорение, м/с ²	500	500
Акустический шум: диапазон частот, Гц звуковое давление, дБ	-	50... 10000 130

Окончание табл. 1.18

1	2	3
Иней, роса	-	Устойчив
Соляной туман	-	Устойчив
Солнечная радиация	-	Устойчив
Плесневые грибы	-	Устойчив

Технические характеристики соединителей ГРПМ1 и СНП34 приведены в табл. 1.19.

Таблица 1.19

Технические характеристики соединителей

Параметры	Тип соединителя	
	ГРПМ1	СНП34
1	2	3
Ток на контактную пару: максимальный, А минимальный, мкА	2,0 1,0	1,0 -
Максимальный рабочий ток на одиночный контакт, А	3,0	1,5
Суммарная токовая нагрузка, А / при числе контактов	46/31 67/45 91/61	-
Температура перегрева контактов, °С, не более	30	-
Максимальное рабочее напряжение, В	250	100
Сопротивление контакта, Ом, не более	0,005	0,015

Емкость между соседними контактами, пФ, не более	2,5	3,0
Сопротивление изоляции: в нормальных условиях, МОм, не менее	1000	5000
после воздействия повышенной температуры, МОм, не менее	50	50
после кратковременного воздействия повышенной влажности, МОм, не менее	20	20
Усилие расчленения, Н / при числе контактов	46,3 / 31 71,4 / 45 91,8 / 61	78,4 / 69 156,8 / 135

Окончание табл. 1.18

1	2	3
Износоустойчивость, число сочленений-расчленений, не менее	1000	500
Минимальная наработка, ч / при числе сочленений-расчленений, не менее	5000 / 1000	10000 / 500
Срок сохраняемости, лет	12	12

Примечание. Контакты разрешается нагружать максимальным током через один.

Запись в конструкторской документации состоит из обозначения части соединителя – слова «Вилка» или «Розетка», условного обозначения и обозначения документа на поставку.

Примеры записи в конструкторской документации:

для вилки ГРПМ1 45-контактной с посеребренными контактами, с согнутыми под углом 90° хвостовиками для монтажа на печатной плате:

Вилка ГРПМ1 – 45У2 – В Ке0.364.006 ТУ;

для розетки 61-контактной с плавающими гнездами, предназначенной для объемного монтажа:

Розетка ГРПМ1 – 61ГШ2 – В Ке0.364.006 ТУ;

для розетки СНП34 135-контактной для монтажа на печатной плате:

Розетка СНП34 – 135 / 132x12 В – 21 – В 6РО.364.011 ТУ.

1.4. Конструкция РЭС и конструкторская иерархия

Под конструкцией РЭС понимается совокупность деталей и материалов с разными физическими свойствами, находящаяся в определенной физической связи (электромагнитной, тепловой, механической и др.), обеспечивающая вы-

полнение заданных функций с необходимой точностью под влиянием внешних и внутренних воздействий и воспроизводимая в условиях производства.

Конструкция РЭС характеризуется рядом особенностей, которые выделяют ее в отдельный класс среди других конструкций:

1) иерархической структурой, под которой подразумевается последовательное объединение более простых электронных устройств (узлов) в более сложные;

2) доминирующей ролью электрических и электромагнитных связей;

3) наличием паразитных связей, порождающих помехи (наводки);

4) наличием тепловых связей;

5) слабой связью внутренней структуры конструкции с её внешним оформлением.

Конструкторская иерархия реализуется с помощью уровней разукрупнения РЭС, габаритные размеры которых стандартизованы. Конструкции нижестоящего уровня совместимы с конструкциями вышестоящих уровней. По конструктивной сложности различают следующие уровни разукрупнения РЭС: стойка (шкаф), блок, ячейка.

Совокупность уровней разукрупнения РЭС определенного назначения образует конструкционную систему. Известны конструкционные системы РЭС измерительных приборов, электронно-вычислительной аппаратуры, телевизионной, связной аппаратуры и др.

1.5. Классификация РЭС

РЭС классифицируются по категориям, классам и группам.

Категории характеризуют РЭС по продолжительности работы. Различают четыре категории РЭС:

многократного;

однократного;

непрерывного;

общего применения.

Классы подразделяют РЭС по трем глобальным зонам использования:

наземные РЭС;

морские;

бортовые (воздушное и космическое пространство).

Внутри классов различают специализированные группы в зависимости от объекта установки. Например, класс наземных РЭС включает в себя четыре основные группы:

стационарные РЭС;

РЭС для подвижных объектов;

носимые РЭС;

бытовые РЭС

Особенности стационарных РЭС:

- 1) продолжительность эксплуатации;
- 2) работа в помещениях с нормальными климатическими условиями;
- 3) транспортирование в специальной упаковке для защиты от механических воздействий (МВ), влаги и других дестабилизирующих факторов;
- 4) высокая ремонтпригодность;
- 5) ограничения на габариты и массу одной стойки (шкафа) для удобства транспортирования, выгрузки и т.д.

Группа РЭС для подвижных объектов имеет три основные особенности:

- 1) повышенные требования к защите от МВ;
- 2) защитные мероприятия от возможных воздействий влаги и пыли;
- 3) возможность погрузки и разгрузки силами двух человек (для массивных РЭС).

К этой группе относят связные, радиолокационные и пеленгаторные станции, диспетчерские станции строителей, передвижные телевизионные студии, автомагнитолы и т.д.

Бытовые РЭС характеризуются тремя основными особенностями:

- 1) повышенной эстетичностью внешнего вида и качеством акустических характеристик;
- 2) возможностью эксплуатации иногда совершенно неподготовленным человеком;
- 3) массовостью производства и определяющим значением стоимости.

Для поддержания спроса у населения используют три основных направления в развитии конструкций бытовых РЭС:

- 1) создание принципиально новых РЭС, вызывающих новые потребности у населения, не зависящие от наличия у потенциальных покупателей старых конструкций (например, появление в свое время цветных телевизоров и т.д.);
- 2) совершенствование ранее выпускавшихся конструкций с целью максимальной автоматизации управления, улучшения характеристик и введения новых функций (например, дистанционное управление и др.);
- 3) повышение технологичности с целью снижения стоимости.

Морские РЭС включают в себя три основные группы:

- судовые (пассажирские, грузовые суда);
- корабельные (морские суда ВМФ);
- буйковые РЭС.

Основные особенности морских РЭС:

- 1) комплексное воздействие климатических и механических факторов (например, 100 %-я влажность при повышенной температуре в солевом тумане и при МВ от двигательных установок);
- 2) длительная автономная работа с отрывом от ремонтных баз.

Группы бортовых РЭС:

- авиационные;
- космические;

ракетные.

Основные требования к бортовым РЭС:

- 1) минимальные масса и объем;
- 2) высокая надежность;
- 3) большое разнообразие воздействующих факторов (МВ, температура и т.д.).

1.6. Классы исполнения РЭС по условиям их эксплуатации

Установлены следующие классы исполнения изделий по условиям их эксплуатации в макроклиматических районах (ГОСТ 15150-69):

- У(N) – для районов с умеренным климатом;
- УХЛ(NF) – с умеренным и холодным климатом;
- ХЛ(F) – с холодным климатом;
- ТВ(ТН) – с влажным тропическим климатом;
- ТС(ТА) – с сухим тропическим климатом;
- Т(Т) – с тропическим как сухим, так и влажным климатом;
- М(М) – с умеренно холодным морским климатом;
- ТМ(ТМ) – с тропическим морским климатом;
- С(V) – все районы, кроме районов с морским климатом;
- ОМ(MW) – с морским климатом;
- В(W) – все макроклиматические районы.

В зависимости от места размещения изделия при эксплуатации в воздушной среде установлены следующие категории размещения:

- 1 – на открытом воздухе;
- 2 – под навесом или в помещениях, где условия эксплуатации несущественно отличаются от категории 1;
- 3 – в закрытых помещениях без искусственного регулирования температуры;
- 4 – в помещениях с искусственно регулируемые условиями эксплуатации;
- 5 – в помещениях с повышенной влажностью (шахты, подвалы и т.д.).

Стандарт устанавливает нормы температуры, влажности и других эксплуатационных параметров для данного класса и категории. Например, для изделия в исполнении УХЛ4 рабочие температуры +1...+35 °С, средняя рабочая температура +20 °С, предельная относительная влажность 80 %.

1.7. Особенности процесса конструирования

Исходными данными для конструирования изделия являются техническое задание (ТЗ) и схема электрическая принципиальная.

В работе конструктора можно выделить следующие составляющие:

- 1) творческая – анализ и синтез различных вариантов конструктивного исполнения;

- 2) техническая – расчеты и выпуск конструкторской документации;
- 3) организационная – руководство исполнителями, проверка, согласование конструкторской документации, передача в архив;
- 4) производственная – сопровождение изготовления изделия;
- 5) корректировочная – изменение конструкторской документации в связи с исправлением ошибок, заменой материалов, усовершенствованием конструкции и т.д.

Наиболее сложной и важной является творческая часть работы, при выполнении которой решаются две задачи:

- 1) анализ – изучение поведения конструкции с заданной структурой, т.е. изучение зависимости показателей качества от отдельных факторов и их совокупности;

- 2) синтез – определение оптимальной структуры конструкции при заданных показателях качества и ограничениях, т.е. генерация некоторого количества новых вариантов конструкций.

На этом этапе наиболее полно проявляются интуиция, опыт и творческие способности конструктора, усиленные коллективной работой с коллегами и использованием диалогового режима между человеком и ЭВМ.

Анализ вариантов конструкции осуществляют, как правило, тремя методами:

- 1) логико-расчетным;
- 2) эвристическим;
- 3) методом моделирования.

Логико-расчетный метод основан на использовании формализованных процессов, повторное применение которых дает сравнимые результаты (расчеты отдельных элементов, блоков и т.д. с использованием ЭВМ).

Эвристический метод – метод экспертных оценок – заключается в том, что для группы специалистов-экспертов формулируют проблему и используют их профессиональный опыт для решения проблемы. Иногда этот метод называют методом мозгового штурма.

При использовании метода моделирования анализ проводят не на самих реальных объектах проектирования, а на их моделях – математических или физических.

1.8. Стадии разработки РЭС

Ввиду того что требования к параметрам разрабатываемых РЭС часто противоречивы (например, малая стоимость и высокая надежность), исходная информация для вновь создаваемых изделий не является достаточно полной, а исполнители при работе могут допускать ошибки, разработку РЭС и их конструкций осуществляют в несколько стадий (обычно не менее двух):

НИР (научно-исследовательская работа);

ОКР (опытно-конструкторская работа).

Каждая стадия включает несколько этапов.

Основные этапы проведения НИР:

- 1) патентный поиск;
- 2) разработка и согласование с заказчиком технического задания (ТЗ) и государственная регистрация НИР;
- 3) подготовительный этап – выбор направлений исследования, разработка, согласование и утверждение частных ТЗ на основные части НИР;
- 4) основной этап – теоретические и экспериментальные исследования (расчеты, моделирование), обработка результатов исследований, составление и оформление технической документации;
- 5) заключительный этап – обобщение результатов и оценка выполненной НИР;
- 6) приемка НИР, обсуждение и согласование задания на проведение ОКР, государственный учет НИР.

Этапы проведения ОКР:

- техническое задание;
- техническое предложение;
- эскизный проект;
- технический проект;
- рабочая документация.

Техническое задание составляется исполнителем на основании технических требований (ТТ) заказчика. На основе общего ТЗ могут быть составлены частные ТЗ для субподрядчиков.

Техническое предложение – этап разработки, на котором исполнителем обосновывается принципиальная возможность создания РЭС с заданными по ТТ характеристиками и намечаются основные технические и организационные решения по выполнению ТЗ.

Эскизный проект – этап, на котором вырабатываются принципиальные инженерные и конструктивные решения, дающие общие представления об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие его назначение и основные параметры.

Технический проект – этап, на котором разрабатывается совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия.

Рабочая конструкторская документация – разработка конструкторской документации, предназначенной для изготовления опытного образца или опытной партии изделий. При разработке РЭС в условиях промышленного производства этап разработки конструкторской документации может включать три основных составляющих:

проектирование изделия на платах с печатным монтажом. Сюда входит обоснование и выбор системы базовых несущих конструкций (БНК), выбор типоразмера печатной платы, размещение электрорадиокомпонентов на поле пла-

ты, проектирование топологии печатного рисунка, в том числе и с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР);

разработка конструкции и выпуск комплекта конструкторской документации на печатную плату и другие элементы конструкции – каркасы, рамы, панели, элементы крепления и др.;

объемное художественное конструирование модулей высоких уровней (блок, шкаф, стойка) с демонстрацией средствами компьютерной анимации вхождения в них модулей низших уровней, взаимодействия элементов конструкции при сборке и в процессе эксплуатации.

1.9. Организация процесса конструирования

В создании РЭС участвуют различные организации, подразделения, исполнители. Организации могут выполнять функции заказчика, исполнителя и субподрядчика.

Заказчик формулирует технические требования к РЭС и осуществляет приемку разработанного изделия. ТТ определяют технические показатели РЭС (мощность, чувствительность и т.д.), а также содержат требования к конструкции:

- наименования, количество и назначение основных частей;
- габаритные, установочные и присоединительные размеры;
- требования по взаимозаменяемости частей, унификации, типизации, стандартизации и преемственности.

Кроме того, ТТ включают требования:

- по охране окружающей среды;
- помехозащищенности;
- составу запасного имущества;
- безопасности работы;
- эргономике и эстетике;
- условиям эксплуатации и т.д.

Исполнитель на основании ТТ разрабатывает ТЗ, в котором содержатся экономические, производственные и другие требования, определяется порядок разработки и приёмки изделия.

Субподрядчик решает для исполнителя частные вопросы:

- разработка и поставка новых материалов, элементов, узлов;
- разработка технологических процессов;
- разработка методов измерений, проведения испытаний и т.д.

При проектировании конструкции РЭС в той или иной степени принимают участие различные подразделения предприятий:

- системотехнические (определение структуры РЭС, например «разбивка на наземную и бортовую части»);

- схемотехнические (разработка принципиальной схемы);

конструкторские (общая компоновка, выпуск конструкторской документации, сопровождение производства);

технологические (установление последовательности изготовления, отработка режимов технологических процессов, подготовка производства);

производственные (изготовление РЭС).

Кроме того, в процессе разработки и изготовлении принимают участие вспомогательные службы:

надежности (рекомендации по структурной и информационной избыточности, проведение испытаний);

снабженческие (поставка покупных изделий и материалов);

патентные;

автоматизированного конструкторского проектирования и др.

Координация работы предприятия, подразделений и специалистов осуществляется с помощью согласованных календарных планов или сетевых графиков.

2. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

2.1. Государственные стандарты

На всех этапах жизненного цикла (разработка – производство – эксплуатация) РЭС сопровождает техническая документация. Состав этой документации и ее содержание определяют государственные стандарты. В настоящее время имеется большое количество стандартов, которые сгруппированы по направлениям жизненного цикла изделий в следующие комплексы:

ЕСКД – единая система конструкторской документации;

ЕСТД – единая система технологической документации;

ЕСПД – единая система программной документации;

ЕСТПП – единая система технологической подготовки производства;

ЕСЗКС – единая система защиты изделий и материалов от коррозии, старения и биоповреждений и др.

Основная задача стандартизации – обеспечить единую нормативно-техническую, информационную, методическую и организационную основу проектирования, производства и эксплуатации изделий. При этом обеспечивается использование единой терминологии, взаимообмен документацией между предприятиями без ее переоформления, совершенствование организации проектных работ, возможность автоматизации разработки технической документации с унификацией машинно-ориентированных форм документов, совершенствование способов учёта, хранения и изменения документации и др. [3].

Например, государственные стандарты, входящие в ЕСКД, устанавливают взаимосвязанные единые правила и положения по порядку разработки, оформления и обращения конструкторской документации на изделия. Этим

стандартам присваивают обозначения по классификационному принципу. Номер стандарта составляется из цифры, присвоенной классу стандартов ЕСКД, одной цифры после точки, обозначающей классификационную группу стандартов в соответствии с табл. 2.1, числа, определяющего порядковый номер стандарта в данной группе, и двузначной цифры (после тире), указывающей год регистрации стандарта. Например, обозначение стандарта ЕСКД «ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению» имеет вид: ГОСТ 2.701-84, т.е. ГОСТ – категория нормативно-технического документа (государственный стандарт), 2 – класс (стандарты ЕСКД), 7 – классификационная группа стандартов, 01 – порядковый номер стандарта в группе, 84 – год регистрации стандарта.

Таблица 2.1

Классификационные группы стандартов в ЕСКД

Шифр группы	Содержание стандартов в группе
0	Общие положения
1	Основные положения
2	Классификация и обозначение изделий в КД
3	Общие правила выполнения чертежей
4	Правила выполнения чертежей изделий машиностроения и приборостроения
5	Правила обращения КД (учет, хранение, дублирование, внесение изменений)
6	Правила выполнения эксплуатационной и ремонтной документации
7	Правила выполнения схем
8	Правила выполнения документов строительных, судостроительных и горных дел
9	Прочие стандарты

2.2. Конструкторские документы

К конструкторским документам относят графические и текстовые документы, которые определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки, изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта. Документы в зависимости от стадии разработки подразделяются на проектные и рабочие.

К первым относятся техническое предложение, эскизный и технический проекты [7].

На стадии создания рабочей документации выполняются следующие работы:

разработка конструкторских документов, предназначенных для изготовления и испытания опытного образца;

изготовление и испытание опытного образца;
корректировка конструкторских документов по результатам испытаний опытного образца;
приемочные испытания опытного образца;
корректировка конструкторской документации по результатам приемочных испытаний опытного образца;
изготовление и испытание установочной серии;
корректировка конструкторской документации по результатам изготовления и испытания установочной серии;
изготовление и испытание головной (контрольной) серии (при необходимости).

Откорректированная в таком порядке документация используется для организации серийного производства изделий. Документам технического предложения присваивается литера «П»; эскизного проекта – «Э»; технического проекта – «Т»; рабочей документации опытного образца – «О»; серийного (массового) производства – «А» или «Б».

2.3. Схемная документация

Схемы разрабатываются на такие изделия, изготовление, описание функционирования и эксплуатация которых невозможны без условного изображения состава и взаимодействия их составных частей.

Схема – это графический конструкторский документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними. Такие документы входят в комплект конструкторской документации и содержат вместе с другими документами необходимые данные для проектирования, изготовления, сборки, регулировки и эксплуатации изделий.

В зависимости от составляющих элементов и связей между ними схемы подразделяются на виды, обозначаемые буквами:

- Э – электрические;
- Г – гидравлические;
- К – кинематические;
- Л – оптические;
- П – пневматические и др.

По основному назначению схем их подразделяют на следующие типы, обозначаемые цифрами:

- 1 – структурная;
- 2 – функциональная;
- 3 – принципиальная;
- 4 – соединений;
- 5 – подключения;
- 6 – общие;
- 7 – расположения;

- 8 – прочие;
- 0 – объединенные.

Наименование схемы определяется ее видом и типом, например:
 схема электрическая структурная – Э1;
 схема электрическая принципиальная – Э3.

Схемы выполняются без соблюдения масштаба, действительное пространственное расположения составных частей изделия не учитывается или учитывается приближенно.

2.4. Схемы электрические принципиальные

Принципиальная схема определяет полный состав элементов и связи между ними и дает детальное представление о принципах работы изделия. Она служит исходным документом для разработки других конструкторских документов, в том числе чертежей. Такие схемы также используются при изучении принципов работы изделий при их наладке, контроле и ремонте. В качестве примера на рис. 2.1 представлена принципиальная схема источника питания.

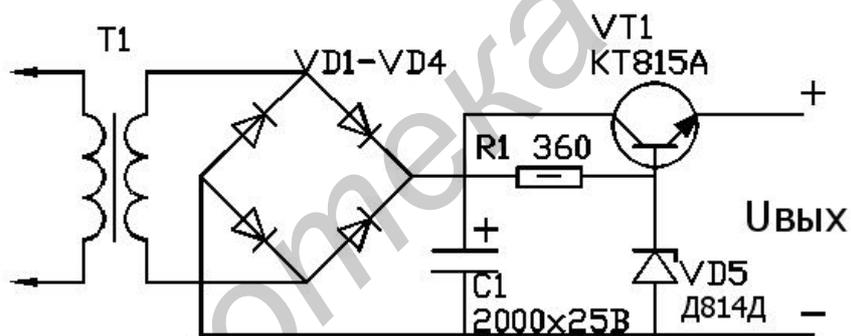


Рис. 2.1. Принципиальная схема источника питания

Позиционные обозначения элементов проставляют на схемах рядом с их установленными графическими обозначениями с правой стороны или над ними.

При указании около условных графических обозначений номиналов резисторов и конденсаторов допускается применять упрощенный способ обозначения единиц измерений. Например, для резисторов:

от 0 до 999 Ом – без указания единиц измерения;

от $1 \cdot 10^3$ до $999 \cdot 10^3$ Ом – в килоомах с обозначением единицы измерения строчной буквой К;

от $1 \cdot 10^6$ до $999 \cdot 10^6$ – в мегаомах с обозначением единицы измерения прописной буквой М;

свыше $1 \cdot 10^9$ – в гигаомах с обозначением единицы измерения прописной буквой Г.

Для конденсаторов:

от 0 до $9999 \cdot 10^{-12}$ Ф – в пикофарадах без указания единицы измерения;

от $1 \cdot 10^{-8}$ до $9999 \cdot 10^{-6}$ Ф – в микрофарадах с обозначением единицы измерения буквами мкФ.

Номинальная мощность рассеяния резисторов обозначается условными знаками (рис. 2.2).

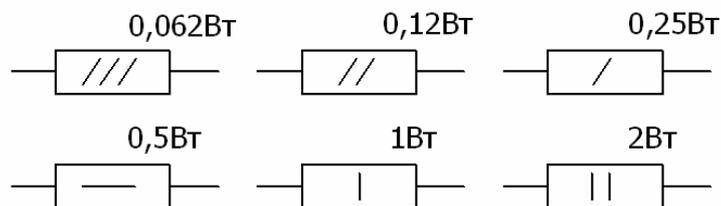


Рис. 2.2. Условные знаки для резисторов соответствующей мощности

Общие требования к выполнению схем устанавливает ГОСТ 2.701-76. Примеры выполнения основных разновидностей схем изложены, например, в справочном пособии [7]. В качестве примера на рис. 2.3 представлена структурная схема источника питания в соответствии с рис. 2.1.

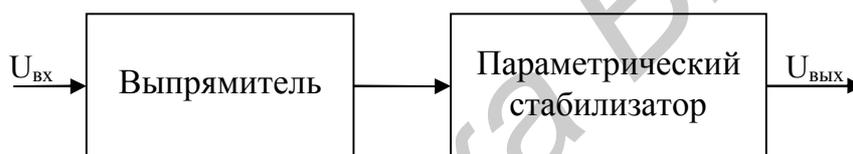


Рис. 2.3. Структурная схема источника питания

Все сведения об элементах, входящих в состав изделия и изображенных на принципиальной схеме, записывают в перечень элементов, который помещают на первом листе схемы или выполняют в виде самостоятельного документа.

В первом случае перечень оформляют в виде таблицы по определенной форме над основной надписью, на расстоянии не менее 12 мм от нее. Продолжение перечня (если это необходимо) помещают слева от основной надписи, повторяя заглавную часть таблицы.

Во втором случае (самостоятельный документ) перечень элементов выполняют на листах формата А4 с присвоением шифра, состоящего из буквы П (перечень) и шифра схемы, к которой оформляется перечень, например, ПЭЗ – перечень элементов к принципиальной электрической схеме.

Пример оформления перечня элементов

Поз. обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
R1	<u>Резисторы</u> С2-33-0,25-221кОм +-1%-А-В-В-А ОЖО.467.173ТУ	1	

2.5. Текстовые документы

К текстовым документам относится расчетно-пояснительная записка. В этом документе излагаются сведения о результатах выполненной работы по проектированию изделия с приложением (при необходимости) графических документов. Пояснительная записка выполняется на листах формата А4. Она в общем случае должна включать следующие разделы:

- введение с указанием, на основании каких документов разработан проект;
- назначение и область применения проектируемого изделия;
- техническая характеристика;
- описание и обоснование выбранной конструкции;
- расчеты, подтверждающие работоспособность и надежность конструкции;
- описание организации работ с применением разрабатываемого изделия;
- ожидаемые технико-экономические показатели;
- уровень нормализованной оценки или унификации.

Общие требования к текстовым документам регламентируются ГОСТ 2.205-95. Формы и правила выполнения – ГОСТ 2.106-68.

2.6. Комплектность конструкторских документов

Конструкторская документация бывает текстовой и графической. Номенклатура (перечень) документации, выполняемой на том или ином этапе проектирования, комплект (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Номенклатура конструкторских документов для различных
этапов проектирования РЭС

Наименование документа	Шифр	Технич. предл.	Эскизный проект	Технич. проект	Рабочая документация на изделия			
					детали	сбор. ед.	комплексы	комплекты
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Чертеж детали	-	-	-	+	(+)	-	-	-
Сборочный чертеж	СБ	-	-	-	-	(+)	-	-
Чертеж общего вида	ВО	+	+	(+)	-	-	-	-
Теоретический чертеж	ТЧ	-	+	+	+	+	+	-
Габаритный чертеж	ГЧ	+	+	+	+	+	+	-
Монтажный чертеж	МЧ	-	-	-	-	+	+	-
Схемы	-	+	+	+	-	+	+	+
Спецификация	СП	-	-	-	-	(+)	(+)	(+)

Окончание табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ведомость покупных изделий	ВП	-	+	+	-	+	+	+
Пояснительная записка	ПЗ	(+)	(+)	(+)	-	-	-	-
Технические условия	ТУ	-	-	-	+	+	+	+
Программа и методика испытаний	ПМ	-	+	+	+	+	+	-
Таблицы	ТБ	+	+	+	+	+	+	+
Расчеты	РР	+	+	+	+	+	+	+
Патентный формуляр	ПФ	+	+	+	+	+	+	-

Примечание. (+) – обязательный документ; «+» – документ составляется по усмотрению разработчика; «-» – документ не составляется.

Обязательными чертежами рабочей документации являются чертежи деталей и сборочные чертежи. На каждую деталь и сборочную единицу выполняют отдельный рабочий чертеж с основной надписью.

Рабочий чертеж должен содержать все сведения для изготовителя и контроля изделия:

графические изображения, полностью отражающие его форму;
необходимые размеры с предельными отклонениями;
указания о шероховатости поверхностей;
технические требования, содержащие различные данные, которые невозможно представить графически.

Текстовые технологические требования записывают в тех случаях, когда они являются единственными гарантирующими качество изделия, например, технологию склеивания, совместной обработки деталей и т.д.

2.7. Технические требования и техническая характеристика

Эти данные располагают над основной надписью. На листах формата более А4 допускается размещение текста в две и более колонки. Пункты технических требований и технической характеристики должны иметь самостоятельную нумерацию. Общая ширина колонки должна быть не более 185 мм.

Технические требования на чертеже излагают, группируя однородные и близкие по своему характеру требования по возможности в такой последовательности:

1) требования, предъявляемые к материалу, заготовке, термической обработке и к свойствам материала готовой детали (например твердость), указание материалов заменителей;

2) размеры (формовочные и штамповочные уклоны, радиусы и пр.), предельные отклонения размеров, не указанных на чертеже, и т.д.;

3) требования к качеству поверхностей (отделка, покрытия);

4) зазоры, расположение отдельных элементов конструкции;

5) требования, предъявляемые к настройке и регулированию изделия;

6) другие требования к качеству изделий, например, бесшумность, виброустойчивость и т.д.;

7) условия и методы испытаний;

8) указания о маркировании и клеймении;

9) правила транспортирования и хранения;

10) особые условия эксплуатации.

Техническая характеристика изделия размещается отдельно от технических требований и имеет самостоятельную нумерацию пунктов. Пример техни-

ческой характеристики – модуль зубчатого зацепления, число зубьев шестерен и т.д.

На поле чертежа могут размещаться и таблицы. Их размещают на свободном поле чертежа справа или ниже изображения изделия. Содержанием таблиц могут быть данные, например, о числе витков и диаметре провода обмоток трансформатора и др.

2.8. Размеры, допуски и посадки на чертежах

Размерные числа, нанесенные на чертеже, должны однозначно определять размеры изделия и его элементов. Размеры, как правило, проставляют от баз. Для каждого размера указывают предельные отклонения. Разновидности баз могут быть следующие:

технологическая, используемая для определения положения заготовки или изделия в процессе изготовления или ремонта;

конструкторская, используемая для определения положения детали или сборочной единицы в изделии;

измерительная, определяющая относительное положение заготовки или изделия и средств измерения.

Базами могут служить кромки плоских деталей, торцы круглых деталей, оси симметрии и др.

Установлены два способа нанесения размеров от баз:

координатный, когда размеры наносятся от одной, основной базы или от нескольких баз лесенкой (рис. 2.4, а);

цепной, когда размеры наносятся цепочкой, исключая один из размеров той части детали, которая не подвергается обработке и имеет самый большой допуск на размер (рис. 2.4, б).

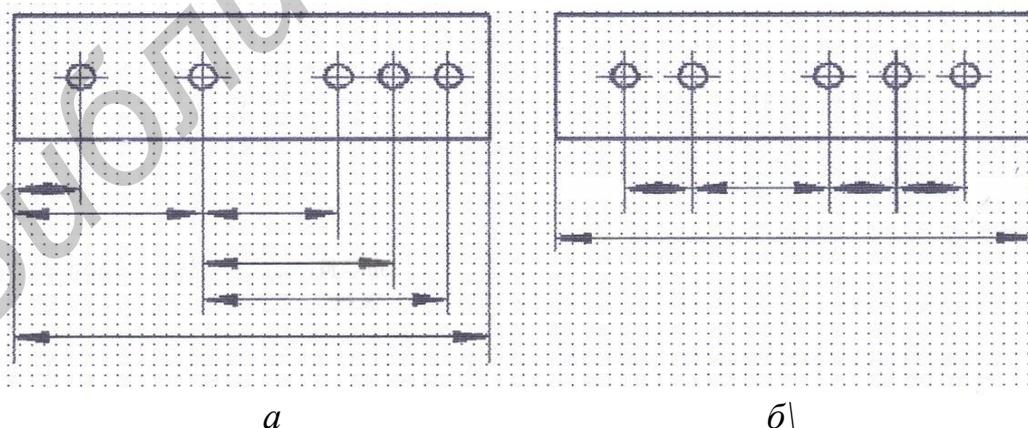


Рис. 2.4. Способы нанесения размеров от баз

Нанесение размеров в виде замкнутой цепи допускается только в том случае, когда один из них указывается как справочный. Справочный размер отмечают на чертежах знаком «*», а в технических требованиях записывают:

* Размер для справок.

Этот размер не выполняется по данному чертежу и указывается для большего удобства пользования чертежом.

Понятия о допусках и посадках для различных видов соединений основывается на некоторых терминах и определениях (рис. 2.5).

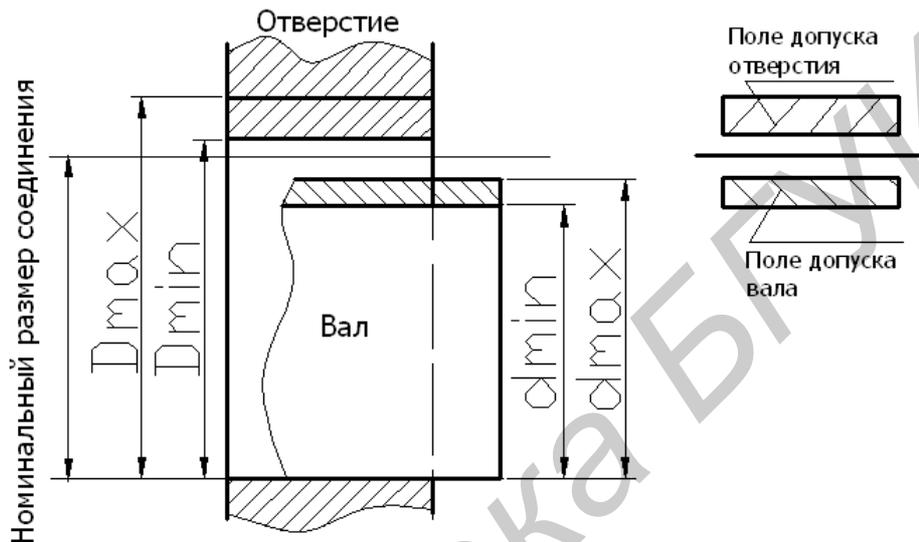


Рис. 2.5. Расположение полей допусков отверстия и вала при посадке с зазором

Допуск – разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами. Предельные отклонения линейных размеров на чертежах указывают одним из трех способов (рис. 2.6):

условными обозначениями полей допусков;

числовыми значениями предельных отклонений;

условными обозначениями полей допусков с указанием справа в скобках числовых значений предельных отклонений.

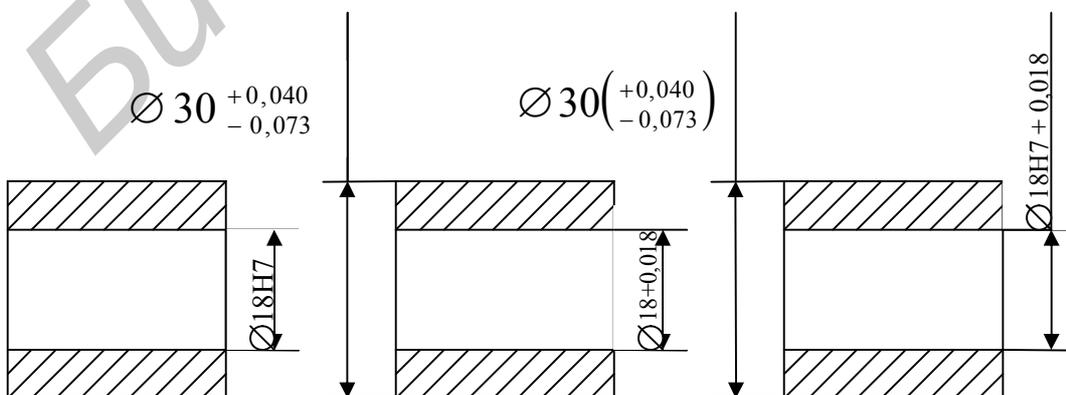


Рис. 2.6. Варианты обозначений на чертежах предельных отклонений линейных размеров

Условное обозначение состоит из буквы, определяющей положение допуска относительно номинального размера, и цифры, соответствующей номеру качества.

Номинальный размер – размер, относительно которого определяются предельные размеры и который служит также началом отсчета отклонений.

Квалитет (степень точности) – ступень градации значений допусков системы. Установлено 19 квалитетов, которые имеют номер 01, 0, 1, 2, ...16, 17. Они образуют единую шкалу точностей в машино- и приборостроении. Ориентировочная применяемость квалитетов: квалитеты 01 – 7 – допуски средств измерения квалитеты 4 – 12 – допуски размеров в посадках; квалитеты 12 – 17 – допуски неответственных размеров (несопрягаемых или в грубых соединениях). Поля допусков отверстий обозначаются прописными, валов – строчными буквами латинского алфавита.

Посадка – характер соединения деталей, определяемый величиной получающихся в нем зазоров или натягов (рис. 2.7). Возможны посадки с зазором, с натягом и переходные посадки, когда возможно получение как зазоров, так и натягов.

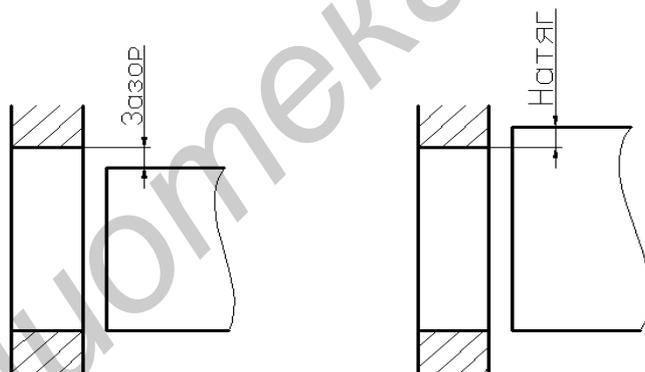


Рис. 2.7. Схема зазора и натяга

Предельные отклонения размеров деталей, изображенных на чертеже в сборе (посадки), указывают в виде дроби: в числителе – для отверстия, в знаменателе – для вала (рис. 2.8).

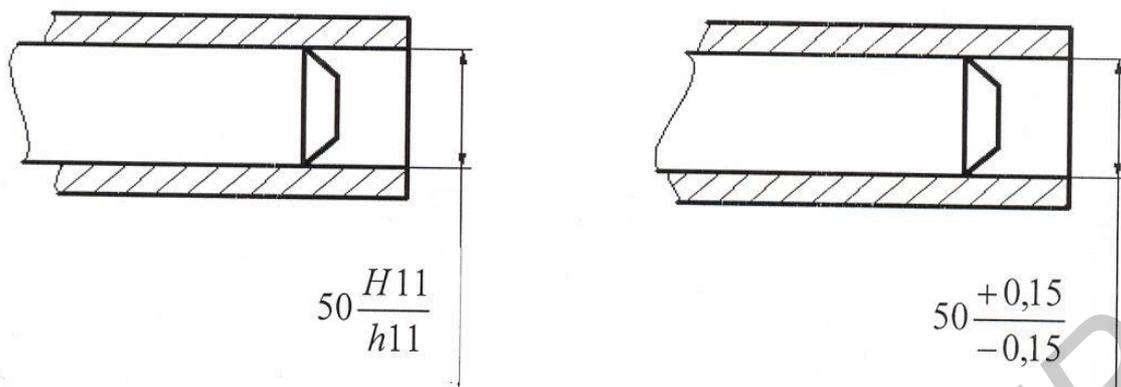


Рис. 2.8. Условное обозначение посадки

Многokратно повторяющиеся на чертежах предельные отклонения относительно низкой точности (от 12-го квалитета и грубее) после номинальных размеров допускается не наносить, а оговорить общей записью в технических требованиях в одном из вариантов:

1. «Неуказанные предельные отклонения размеров: отверстия – по H14, валов – по h14, остальных – $\pm \frac{IT\ 12}{2}$ ».

2. «Неуказанные предельные отклонения размеров $\pm \frac{IT\ 14}{2}$ ».

Обозначение $\pm \frac{IT}{2}$ рекомендуется для симметричных отклонений потому, что оно распространяется на размеры различных элементов, которые не относятся к валам и отверстиям (расстояние между осями и т.д.)

В процессе проектирования используется 3 метода выбора допусков и посадок на детали и сборочные единицы:

1. Метод прецедентов заключается в том, что в чертежах на детали различных изделий, находящихся в эксплуатации, находят однотипные детали и по ним определяют допуски на размеры проектируемой детали.

2. Метод подобия. Используя классификационные материалы, устанавливают аналог проектируемой детали и по нему определяют допуски и посадки на проектируемое изделие.

Общими недостатками методов прецедентов и подобия являются возможность применения неправильно установленных допусков и посадок и сложность определения признаков для выбора аналогов.

3. Расчетный метод. Для повышения точности и надежности детали целесообразно при проектировании максимально приблизить размеры детали к расчетным значениям. Однако при этом подходе могут возникать трудности технологического и метрологического характера. Обработка детали по более точному допуску требует более сложного оборудования, дорогого инструмента и

высокой квалификации рабочего. Таким образом, требования к точности и стоимости находятся в противоречии (рис. 2.9).

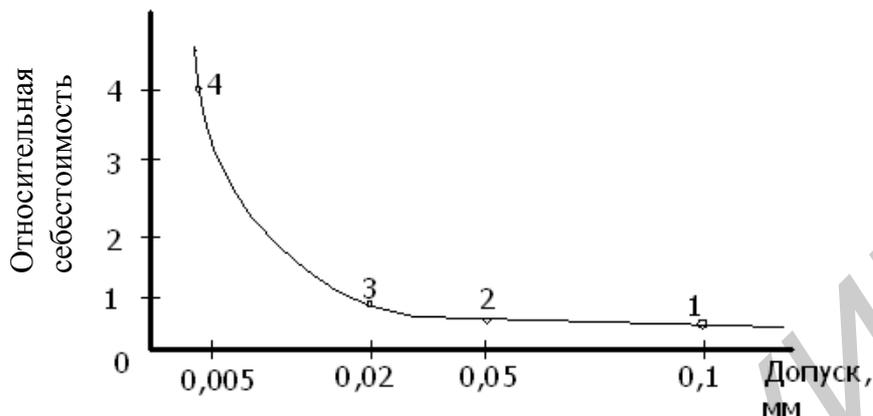


Рис. 2.9. Зависимость между стоимостью и точностью обработки:

- 1 – холодное волочение; 2 – обработка на токарном станке;
3 – обработка и шлифование; 4 – обработка, шлифование и притирка

При определении допусков необходимы технико-экономические расчеты.

2.9. Параметры шероховатости и их обозначение на чертежах

Шероховатость – одна из основных геометрических характеристик качества поверхности деталей, оказывающая влияние на эксплуатационные показатели. Требования к шероховатости поверхности должны устанавливаться исходя из функционального назначения поверхности для обеспечения заданного качества изделий.

Шероховатость поверхности оценивается по неровностям профиля, получаемого путем сечения реальной поверхности плоскостью.

В практике проектирования деталей РЭС наиболее часто используются два параметра шероховатости – R_z и R_a . R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам. R_a – среднее арифметическое отклонение профиля.

Таблица 2.3

Рекомендации по выбору шероховатости поверхностей

Шероховатость	Рекомендации по применению
R_z 320	Очень грубые поверхности, не подвергающиеся механической обработке, например поверхности отливок хорошего качества
R_z 160	
R_z 80	Грубые, не соприкасающиеся друг с другом поверхности. Отверстия на проход крепежных деталей
R_z 40	Свободные поверхности валов, втулок. Поверхности головок

	ВИНТОВ
$R_z 20$	Поверхности деталей, прилегающие к поверхностям других деталей, не трущиеся и не подвергающиеся износу
$R_a 2,5$	Прилегающие друг к другу, но не трущиеся поверхности высокого качества
$R_a 1,25$	Трущиеся поверхности при невысоких требованиях к стабильности зазора
$R_a 0,63$	Соприкасающиеся поверхности, противостоящие износу
$R_a 0,32$	Соприкасающиеся и декоративные поверхности особо высокого качества
$R_a 0,16$	Притираемые поверхности

Используется три основных способа регламентации конструктором качества поверхности, в том числе шероховатости:

- 1) по прототипу (метод прецедентов);
- 2) расчетный;
- 3) экспериментальный.

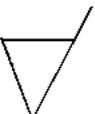
Обозначение шероховатостей поверхностей на чертежах:



– поверхность, не обрабатываемая по данному чертежу;



– поверхности, вид обработки которых конструктором не устанавливается;



– поверхности, вид обработки которых определен конкретно, например, точение или фрезерование;



$R_a 0,025$ – поверхности, вид обработки которых является единственным.

Значение параметра шероховатости указывают в обозначении шероховатости для параметра $R_a - \sqrt{R_a 0,2}$, а для параметра $R_z - \sqrt{R_z 80}$.

2.10. Сборочные чертежи и их содержание

Сборочный чертеж должен содержать:

изображение сборочной единицы, позволяющее осуществить ее сборку и контроль;

размеры, предельные отклонения и другие параметры и требования, которые должны быть выполнены или проконтролированы по сборочному чертежу;

указания о выполнении разъемных соединений, если точность сопряжения достигается пригонкой или подбором, и указания о методах и характере сопряжения;

номера позиций составных частей, входящих в изделие;

габаритные, установочные, присоединительные и другие необходимые справочные размеры;

техническую характеристику изделия (при надобности);

координаты центра тяжести (при необходимости).

Как правило, сборочные чертежи выполняют с упрощениями, например, допускается выполнять изображение одной из нескольких одинаковых частей, а изображения остальных давать упрощенные, в виде внешних очертаний. На разрезах изображают нерассеченными составные части, на которые оформлены самостоятельные сборочные чертежи.

Типовые, покупные и другие широко применяемые изделия и элементы изображают внешними очертаниями. На сборочных чертежах допускается не показывать:

фаски, проточки, углубления, выступы, накатки и другие мелкие элементы; зазоры между стержнями и отверстиями;

крышки, щиты, кожухи, перегородки и т.д.; если необходимо показать закрытые или составные части изделия, над изображением делают соответствующую надпись, например «Крышка не показана»;

надписи на табличках, шкалах и других подобных деталях, изображая только их контур.

Составным частям изделия присваивают номера позиций и указывают их в спецификации. На сборочном чертеже номера позиций указывают на изображениях составных частей, видимых на основных видах и заменяющих их разрезах. На выносных полках номера позиций располагают параллельно основной надписи чертежа вне контура изображения и группируют их в колонку или строчку по возможности на одной линии. Проставляют их, как правило, один раз. Иногда допускается указывать повторно номера позиций одинаковых составных частей. Шрифт номеров позиций должен быть на 1 – 2 номера больше, чем размер шрифта для размерных чисел на том же чертеже.

Допускается делать общую линию-выноску с вертикальным расположением номеров позиций: для группы крепежных деталей (винт, гайка, шайба), относящихся к одному и тому же месту крепления, и для группы деталей с отчетливо выраженной взаимосвязью. На сборочных чертежах указывают следующие размеры:

габаритные – длина, ширина, высота;
 монтажные – размеры, определяющие взаимное расположение составных частей сборочной единицы;
 установочные – размеры, по которым изделия присоединяются друг к другу или к устройству;
 эксплуатационные – диаметры проходных отверстий и др.
 Габаритные, установочные, присоединительные, размеры движущихся частей изделия относятся к справочным, и их обозначают звездочкой «*».

2.11. Спецификация и порядок ее оформления

Спецификация – документ, определяющий состав изделия и всей конструкторской документации, относящейся к этому изделию. Ее составляют и оформляют на отдельных листах формата А4 на каждую сборочную единицу, комплекс и комплект.

В зависимости от состава изделия спецификация может состоять из разделов, которые следует располагать сверху вниз в такой последовательности:

- документация;
- комплексный;
- сборочные единицы;
- детали;
- стандартные изделия;
- прочие изделия;
- материалы;
- комплекты.

Наименования разделов записываются в виде заголовков в графе «Наименование» строчными буквами (кроме первой прописной) и подчеркивают. Ниже и выше заголовка – одна свободная строка.

Пример оформления спецификации приведен ниже.

Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примеч.
		<u>Документация</u>		
	ИПФС.677111.008 СБ	Сборочный чертеж		
		<u>Сборочный чертеж</u>		
	ИПФС.684145.060	Катушка	1	
		<u>Детали</u>		
3	ИПФС.721641.134	Втулка	1	

5	ИПФС.725647.117	Крышка	1	
7	ИПФС.727453.101	Ползун	1	
9	ИПФС.727541.124	Упор	1	
11	ИПФС.728487.304	Корпус		
13	ИПФС.801421.117	Пружина		
		<u>Стандартные изделия</u>		
16		Винт М2х6.01.016		
		ГОСТ14703-74	4	
17		Винт М3х10.01.016		
		ГОСТ 14703-74	2	
21		Шайба 3.651		
		ГОСТ 6402-70	2	

3. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ РЭС

3.1. Несущие конструкции РЭС

Несущие конструкции предназначены для размещения компонентов РЭС и обеспечения их функционирования в реальных условиях эксплуатации. Их использование позволяет обеспечить компоновку, теплоотвод, экранирование и заземление, а также повысить надёжность и технологичность составных частей и изделия в целом.

Конструкционные системы – совокупность базовых несущих конструкций, находящихся в определённой соподчинённости на основе единого модуля и оптимальной технологии производства. Они предназначены для создания оптимальных компоновок РЭС с учётом функциональных, механических, тепловых факторов, требований эргономики и ремонтпригодности. Существует большое разнообразие конструкционных систем РЭС, предназначенных для различных видов аппаратуры:

- базовые несущие конструкции РЭС;
- базовые несущие конструкции ЭВМ;
- стойки аппаратуры систем передачи информации по проводным линиям связи;
- конструкционная система студийной телевизионной аппаратуры;
- шкафы и корпуса блоков электронных измерительных приборов;
- конструкционная система авиационной аппаратуры;

базовые несущие конструкции судовой аппаратуры и т.д.

Для сложных РЭС наиболее употребительной является следующая иерархия конструкционных систем (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Иерархия конструкционных систем

В качестве несущей конструкции для модуля первого уровня чаще всего используются печатные платы, устанавливаемые на металлические рамки. Такую сборку иногда называют ячейкой. На печатной плате устанавливаются элементы нулевого уровня – ИС, микросборки, ЭРЭ, а также элементы коммутации, регулировки и т.д.

Несущей конструкцией модуля второго уровня является корпус блока. Основные разновидности корпусов (рис. 3.2) – разъемная (а) и книжная (б) конструкции.

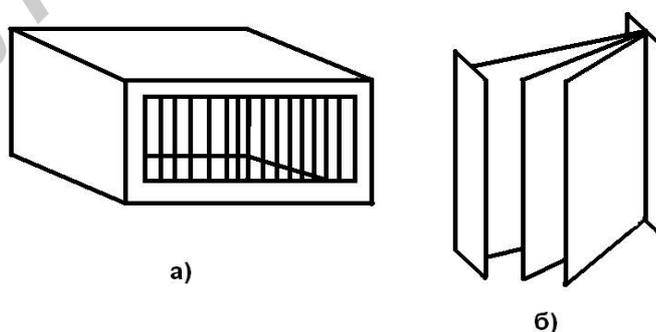


Рис. 3.2. Разновидности конструкций корпусов блоков

Достоинства разъемной конструкции – легкоъемность ячеек, а следовательно, высокие ремонтпригодность и эксплуатационное обслуживание. Основной недостаток – увеличенные масса и объем из-за наличия разъемов в каж-

дой ячейке. Область использования – бытовая, измерительная аппаратура, ЭВМ и т.д.

Достоинства книжной компоновки – высокая компактность, малые масса и объем, легкий доступ к ИС и ЭРЭ при ремонте, возможность проверки и отладки устройства во включенном состоянии. Недостаток – затрудненный демонтаж ячеек, что увеличивает время ремонта. Книжный вариант чаще всего применяется для бортовых устройств с высокой надежностью, где требования уменьшения массы и габаритов являются доминирующими.

Несущими конструкциями модулей третьего уровня могут быть:

для стационарной аппаратуры – шкафы, стойки, пульта;

для бортовых РЭС – виброизоляция рама или стеллаж.

Более детальные параметры соответствующих конструкционных систем приводятся в отраслевых стандартах.

3.2. Конструктивные разновидности корпусов интегральных микросхем

Интегральная микросхема (ИМС) – микроэлектронное изделие, выполняющее определённую функцию преобразования, обработки сигнала и накопления информации и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединённых элементов и кристаллов, которое с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматривается как единое целое.

Различают два основных класса микросхем: полупроводниковые и гибридные.

Полупроводниковая ИМС – это монолитное устройство, в котором все элементы изготовлены на единой полупроводниковой подложке и в едином технологическом цикле. Особенность технологического процесса производства полупроводниковых ИМС заключается в том, что одновременно с изготовлением транзисторных структур необходимо получать диоды, резисторы и конденсаторы в соответствии с принципиальной схемой ИМС. Принципиальным недостатком полупроводниковых ИМС является невозможность практической реализации на основе эффектов в полупроводниках индуктивных элементов, которые можно было бы использовать для выполнения определённых схемотехнических функций. К их недостаткам следует отнести и невозможность получения широкой шкалы номинальных значений сопротивлений диффузионных резисторов и емкостей конденсаторов.

Гибридные интегральные схемы (ГИС) – это устройства, в которых пассивные элементы (резисторы и конденсаторы) выполняются по плёночной технологии, а активные элементы являются навесными, т.е. компонентами. Степень миниатюризации ГИС определяется количеством используемых навесных компонентов, для размещения которых необходима определённая площадь, и геометрическими размерами плёночных элементов. ГИС широко используются в устройствах СВЧ, а также в тех случаях, когда требуется получить конденса-

торы большой ёмкости или мощные резисторы. При массовом выпуске различных ИМС малой мощности, особенно предназначенных для ЭВМ, используются в основном полупроводниковые ИМС.

По варианту конструктивного исполнения различают корпусные и бескорпусные ИМС. Корпусированные элементы используются в основном в негерметичных конструкциях. Их достоинством является защищенность элементов ИМС от дестабилизирующих факторов, а недостатками – увеличение габаритов, массы и стоимости из-за наличия корпуса и усложнения сборки, ухудшение теплоотвода, а также электрических параметров (из-за увеличения длины выводов, их сопротивления, индуктивности, межвыводной ёмкости). Однако применение корпусированных ИМС не исключает необходимости защиты от дестабилизирующих факторов других элементов РЭС – проводников, печатных плат, электрических соединений и т.д.

Основные разновидности корпусов, используемых в настоящее время ИМС, представлены на рис. 3.3.

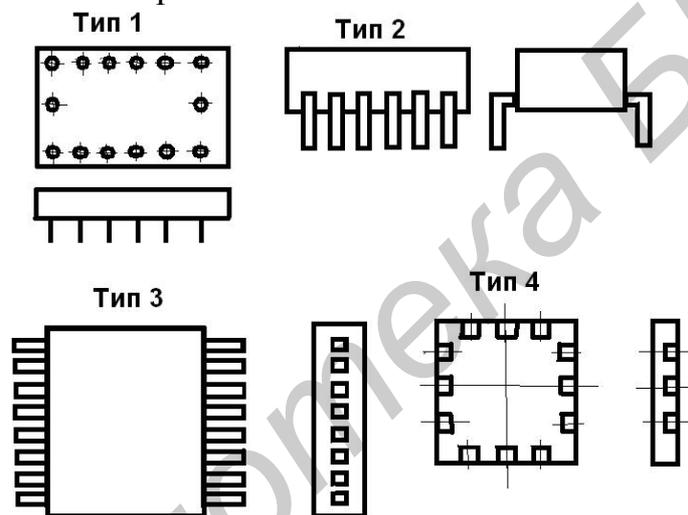


Рис. 3.3. Разновидности корпусов ИМС

Они различаются формой, видом и расположением внешних выводов, которые бывают штырьковыми, планарными, расположенными с шагом 0,625; 1,0; 1,25; 1,7; и 2,5 мм.

Каждая разновидность корпуса имеет свои достоинства и недостатки. Так, например, корпус с планарными выводами для установки и монтажа требует на печатной плате почти вдвое большей площади, чем корпус с ортогональным расположением выводов. Однако установка таких корпусов возможна с двух сторон платы. Жесткие штыревые выводы с ортогональной ориентацией относительно плоскости основания позволяют устанавливать микросхемы на плату без дополнительного крепления даже при жестких вибрационных и ударных нагрузках. При совместной установке микросхем и ЭРЭ для упрощения монтажных работ рекомендуется использовать корпуса со штыревыми выводами. Пластмассовые корпуса дешевы, хорошо противостоят механическим воздействиям, но хуже других типов корпусов защищают от климатических воздействий и перегрева. Для улучшения теплоотведения в пластмассовые корпуса не-

которых интегральных микросхем вводятся теплоотводящие металлические шины.

3.3. Выбор материалов для элементов конструкций изделий РЭС

Выбор материалов для конструкций и деталей РЭС является сложной задачей из-за многовариантности, т.к. изделие РЭС можно создать либо из различных материалов, либо из их сложных совокупностей.

Правильный выбор материала может быть сделан на основе анализа функционального назначения детали, условий ее эксплуатации и технологических показателей с учётом следующих факторов:

1. Материал является основой конструкции, т.е. определяет способность детали выполнять рабочие функции в изделии и противостоять воздействию дестабилизирующих климатических и механических факторов. Например, в качестве диэлектрика конденсатора постоянной ёмкости, работающего в контуре высокой частоты, применяют материал с малым значением тангенса угла диэлектрических потерь. В противном случае конденсатор внесёт большое затухание в контур и снизит его добротность.

2. Материал определяет технологические характеристики детали, т.к. обрабатывается определёнными технологическими методами. Например, объёмные детали из текстолита можно обрабатывать только резанием. Те же детали из пластмасс изготавливают прессованием, что даёт большую производительность при серийном и массовом производстве. При прочих равных условиях выбирать следует тот материал, который допускает обработку наиболее прогрессивными методами: штамповкой, литьем, прессовкой, обработкой на станках-автоматах и т.д. Особенно это относится к деталям сложной формы, т.к. обработка их резанием увеличивает трудоёмкость и материальные затраты.

3. От свойств материала зависит точность изготовления детали. Точность штамповочных гнутых изделий зависит от упругих свойств материала, т.к. после изъятия детали из штампов она стремится в какой-то степени принять свою первоначальную форму. Отсюда следует, что деталь из мягкой стали при прочих равных условиях будет изготовлена с большей точностью, чем деталь из пружинящей стали.

4. Материал влияет на габариты и массу прибора. Так, использование алюминиевых сплавов взамен стали может дать уменьшение массы в 1,5 – 3 раза при полном удовлетворении требований к прочности и жёсткости.

5. Материал определяет эксплуатационные характеристики детали, её надёжность и долговечность. Контакты переключателя из латуни в сложных климатических условиях выдерживают незначительное число переключений. Календарный срок службы этих контактов независимо от числа переключений также крайне ограничен, т.к. окисление материала с течением времени приводит к нарушению электрического контакта в переключателе. Эти детали, имеющие покрытия из золота или серебра, выдерживают десятки тысяч пере-

ключений и в определённых условиях могут эксплуатироваться годами. Однако применение таких материалов резко увеличивает стоимость детали. В любом случае применение дефицитных и дорогостоящих материалов должно быть строго регламентировано и экологически обосновано.

При изготовлении элементов конструкций РЭС широко используются различные металлы и пластмассы. Пластмассы по сравнению с металлами обладают следующими достоинствами:

- меньшая плотность;
- химическая стойкость и влагостойкость;
- вибропоглощающая способность;
- прозрачность или полупрозрачность;
- легче обрабатываются;
- поддаются сплошной окраске (в объеме);
- меньшая стоимость и др.

Некоторые недостатки пластмасс:

- меньшая прочность;
- большие значения коэффициентов линейного расширения;
- меньшая теплостойкость;
- способность к поглощению влаги;
- воспламеняемость;
- ухудшение свойств при действии ультрафиолетового излучения.

Для изготовления несущих элементов конструкций РЭС (рамы, элементы корпусов и т.д.) используются тонколистовые стали, алюминиевые, магниевые и титановые сплавы. Обычно используют прокат толщиной до 2 мм в виде листов, лент, гнутых профилей из углеродистой стали 10кп, алюминиевых сплавов АМц, Д16, В-95, АЛ2. Используются также магниевые сплавы МА2-1, МА-8, титановые сплавы ОТ4 и ВТ1-0. Сталь 10кп (углеродистая, качественная, высокой пластичности) хорошо сваривается и деформируется в холодном состоянии. Применяется в случаях, когда при изготовлении деталей необходимы значительные пластические деформации (гиб, высадка, холодная штамповка, отбортовка и т.д.) [9].

Наиболее высокопластичный из алюминиевых сплавов – алюминий-марганцевый сплав АМц, обладающий повышенной коррозионной стойкостью. Как и другие алюминиевые сплавы, он в 3 раза легче стали. Алюминиевый сплав Д16 более прочный и более жесткий, чем сплав АМц.

Магниевые сплавы в 1,5 раза легче алюминиевых, и их используют при жестких требованиях к минимизации массы конструкции. Однако по некоторым другим параметрам, в том числе по коррозионной стойкости и стоимости, они уступают алюминиевым.

Титановые сплавы, обладающие высокой прочностью и твердостью, сравнимой с твердостью стали, коррозионно-стойки и почти в 2 раза легче стали. Однако они являются труднообрабатываемыми (быстрый износ штампов) и их стоимость в несколько раз выше стоимости стали. Для изготовления магнито-

проводов, трансформаторов, дросселей и т.п. используются магнитные материалы: электротехническая сталь (Э310, Э320, Э330), пермаллой (сплав железа и никеля), карбонильное железо, альсифер, ферриты. Для изготовления отдельных элементов конструкций, например, контактных групп переключателей и т.д., используются такие медные сплавы, как латунь Л-63 (медно-цинковый сплав) и бронза Бр.52 (сплав меди и олова).

Для изготовления намоточных и монтажных проводов используется медь марки М1.

Из диэлектрических материалов наиболее употребляемыми в конструкциях РЭС являются: гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, фторопласт, эбонит, полистирол, керамика, стекло, ситалл и др. Для изготовления печатных плат используется гетинакс фольгированный листовой марки ГФ-1-35-2,0 (ГОСТ 1036-78) с толщиной листа 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 мм и стеклотекстолит фольгированный марок СФ-1 или СФ-2. Толщина листа, мм: 0,8; 1,0; 1,5; 2,0;

3.4. Разновидности и особенности разъемных и неразъемных соединений

Разъемные и неразъемные виды соединений используются при сборке конструкций РЭС и их элементов. Основным видом разъемных соединений является резьбовое, с использованием которого крепятся панели, каркасы, направляющие, переключатели, переменные резисторы, трансформаторы, ручки, электроизмерительные приборы и др. Крепежные элементы – винты, болты, шпильки, гайки и шайбы.

В условиях крупносерийного и массового производства целесообразно применять автоматическое оборудование, в котором сопряжение собираемых деталей, подача и ориентация крепежа, выполнение соединений осуществляются механизмами в едином технологическом цикле.

Неразъемные механические соединения выполняются пайкой, сваркой, развальцовкой, заклёпками, склеиванием, обжимкой и опрессовкой. Краткая характеристика некоторых неразъемных соединений приведена ниже.

При пайке зазор между соединяемыми элементами заполняется расплавленным припоем без плавления основного материала элементов. Используемые припои – ПОС61, ПОС40 и др. В качестве флюса для предотвращения негативного влияния окислой пленки используется канифоль и другие специальные растворы.

Виды сварки, применяемые при производстве РЭС: точечная, роликовая, ультразвуковая и др. Выбранный вид сварки должен помимо необходимых прочностных и эксплуатационных свойств конструкции обеспечить ее минимальную деформацию в процессе и после сварки, что зависит от жесткости конструкции, режима сварки и толщины соединяемых элементов.

Клеевые соединения являются технологичными и достаточно прочными. Их использование снижает стоимость изделий и уменьшает их массу.

Достоинства клеевых соединений:

возможность соединения разнородных материалов;
возможность получения качественного соединения тонких элементов конструкций;

герметичность соединения.

Недостатки клеевых соединений:

низкая теплостойкость;

меньшая долговечность из-за старения клея;

сложный контроль качества соединений;

сильная зависимость прочности клеевого соединения от качества подготовки склеиваемых поверхностей.

Заклепочные соединения используют для деталей из несвариваемых, а также не допускающих нагрева материалов. Эти соединения вытесняются более экономичными – сварными и клеевыми. Материал для заклёпок – пластичные металлы и сплавы (алюминиевые сплавы, стали, латуни и др.).

3.5. Технологичность конструкций РЭС

Технологичность – совокупность свойств конструкции изделия, проявляемых в возможности оптимальных затрат труда, средств, материалов и времени на всех этапах производства, изготовления, эксплуатации и ремонта по сравнению с соответствующими показателями для однотипных конструкций. Для оценки мер по повышению технологичности вновь разрабатываемой конструкции РЭС проводится технико-экономический анализ, в результате которого устанавливается технико-экономический эффект, обусловленный внедрением новой техники и технологии с учетом дополнительных затрат на проектирование и подготовку производства. Технико-экономический эффект проявляется в виде экономии затрат и удовлетворении каких-либо потребностей людей (например видеозапись, цифровой фотоаппарат и т.д.).

3.5.1. Показатели технологичности

Технологичность конструкции определяется на основе показателей технологичности, которые различаются:

по области проявления (производственные, эксплуатационные);

по целям анализа (технические, технико-экономические);

по системе оценки (базовые, разрабатываемой конструкции);

по степени значимости (основные, дополнительные) и др.

Некоторые показатели могут иметь разновидности. Так, производственная технологичность конструкции изделия характеризуется конструкторскими и технологическими показателями технологичности. Конструкторские показатели определяют конструктивную преемственность изделия и применяемость новых составных частей, обусловленных его функциональным назначением.

Технологичность конструкции может быть:

производственной;

эксплуатационной;
ремонтной.

Производственная технологичность определяет объем работ по технологической подготовке производства, сложность изготовления, удобство монтажа вне предприятия-изготовителя.

Эксплуатационная технологичность определяет объем работ при подготовке изделия к использованию по назначению, техническому ремонту и утилизации.

Ремонтная технологичность характеризует объем работ при всех видах ремонта кроме текущего.

3.5.2. Методы обеспечения и оценка технологичности

Основными методами обеспечения технологичности являются:

1. использование наиболее простой и отработанной в производстве конструкторской иерархии (базовой конструкции);
2. выбор прогрессивных способов формообразования деталей;
3. уменьшение числа уровней разукрупнения конструкций РЭС и выбор их формы и размеров с учётом унифицированной оснастки и стандартного оборудования;
4. уменьшение номенклатуры используемых материалов;
5. уменьшение применения дефицитных или токсичных материалов, драгоценных металлов;
6. обоснованный выбор качества точности, шероховатости поверхности;
7. конструктивная и функциональная взаимозаменяемость узлов, минимизация числа подстроечных и регулировочных элементов;
8. контролепригодность и инструментальная доступность элементов, деталей и узлов.

Количественная оценка технологичности конструкций РЭС проводится по системе базовых показателей (табл. 3.1), включающих отработанные и достигнутые при доработке и совершенствовании изделия параметры. По базовым показателям рассчитывается комплексный показатель технологичности:

$$K_{max} = \frac{\sum_1^7 K_i \varphi_i}{\sum_1^7 \varphi_i},$$

где φ_i – коэффициент весовой значимости соответствующего показателя.

Таблица 3.1

Базовые показатели технологичности

Показатель	Формула расчёта	Значимость φ_i	Примечания
1	2	3	4
Коэффициент использования		1,0	$N_{ИМС}$ – количество ИМС; $N_{ЭРЭ}$ – количество других на-

ИМС и микро-сборок	$K_{ИМС} = \frac{H_{ИМС}}{H_{ИМС} + H_{ЭРЭ}}$		весных элементов
Коэффициент механизации и автоматизации монтажа	$K_{АМ} = \frac{H_{АМ}}{H_M}$	1,0	H_M – общее количество контактных соединений; $H_{АМ}$ – количество соединений, выполняемых механизированным способом
Коэффициент механизации подготовки к монтажу	$K_{МП} = \frac{H_{МПЭРЭ}}{H_{ЭРЭ}}$	0,8	$H_{МПЭРЭ}$ – количество навесных элементов, подготавливаемых к монтажу механизированным способом; $H_{ЭРЭ}$ – общее количество навесных элементов
Коэффициент механизации контроля и настройки	$K_{МКН} = \frac{H_{МКН}}{H_{КН}}$	0,5	$H_{КН}, H_{МКН}$ – общее и осуществляемое механизированным способом количество операций контроля
Коэффициент повторяемости ЭРЭ	$K_{ПОВ} = 1 - \frac{H_{ТЭРЭ}}{H_{ЭРЭ}}$	0,3	$H_{ТЭРЭ}$ – количество типоразмеров ЭРЭ; $H_{ЭРЭ}$ – общее количество ЭРЭ
Коэффициент применяемости ЭРЭ	$K_{ПЭРЭ} = 1 - \frac{H_{Т.ОРЭРЭ}}{H_{Т.ЭРЭ}}$	0,2	$H_{Т.ОРЭРЭ}$ – количество типоразмеров оригинальных ЭРЭ; $H_{Т.ЭРЭ}$ – общее количество типоразмеров ЭРЭ

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4
Коэффициент прогрессивности формообразования деталей	$K_{\phi} = \frac{D_{ПР}}{D}$	0,1	$D_{ПР}$ – число деталей, изготавливаемых прогрессивными методами; D – общее число деталей

Расчетное значение $K_{ТЕХ}$ сравнивается с нормативным K_H , который для серийного производства узлов РЭС изменяется в пределах 0,5–0,8, для установочной серии – 0,45–0,75 и для опытного образца – 0,4–0,7 [3].

Разработанное изделие должно иметь комплексный показатель технологичности не ниже нормативного, в этом случае конструкция изделия считается технологичной. Если расчётное значение $K_{ТЕХ}$ ниже нормативного, то изделие подлежит доработке с целью получения более высокого показателя технологичности.

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ РЭС

4.1. Классификация методов электрических соединений

Компоновка РЭС осуществляется пространственным размещением компонентов по уровням конструкторской иерархии. Отдельные компоненты РЭС (ЭРЭ, ИМС и др.), элементы конструкторской иерархии должны быть электрически соединены между собой. Электрические соединения – часть конструкции, предназначенная для обеспечения электрически неразрывных связей элементов и составных частей РЭС между собой в соответствии с принципиальной или монтажной схемой. Технологический процесс выполнения электрических соединений называется электромонтажом (монтажом).

Качество выполнения электрических соединений и его конструктивное и технологическое исполнение в значительной степени определяют эффективность и качество конструкции всего РЭС. Электрические соединения могут вносить искажения, затухание и задержку непрерывного или дискретного сигнала при распространении в электрической линии связи, а возникающие в ней паразитные связи и помехи могут нарушить нормальное функционирование РЭС.

Трудоемкость сборочных и электромонтажных работ при производстве РЭС составляет 40...60 % всей трудоемкости изготовления изделий.

Надежность РЭС при эксплуатации в значительной степени определяется числом контактов, входящих в электрические соединения, вероятность отказа каждого из которых соответствует примерно вероятности отказа всего микроэлектронного узла на кристалле. Таким образом, чем меньше контактов и контактных групп, тем выше надежность изделия.

На рис. 4.1 представлены конструкторско-технологические методы электромонтажа.

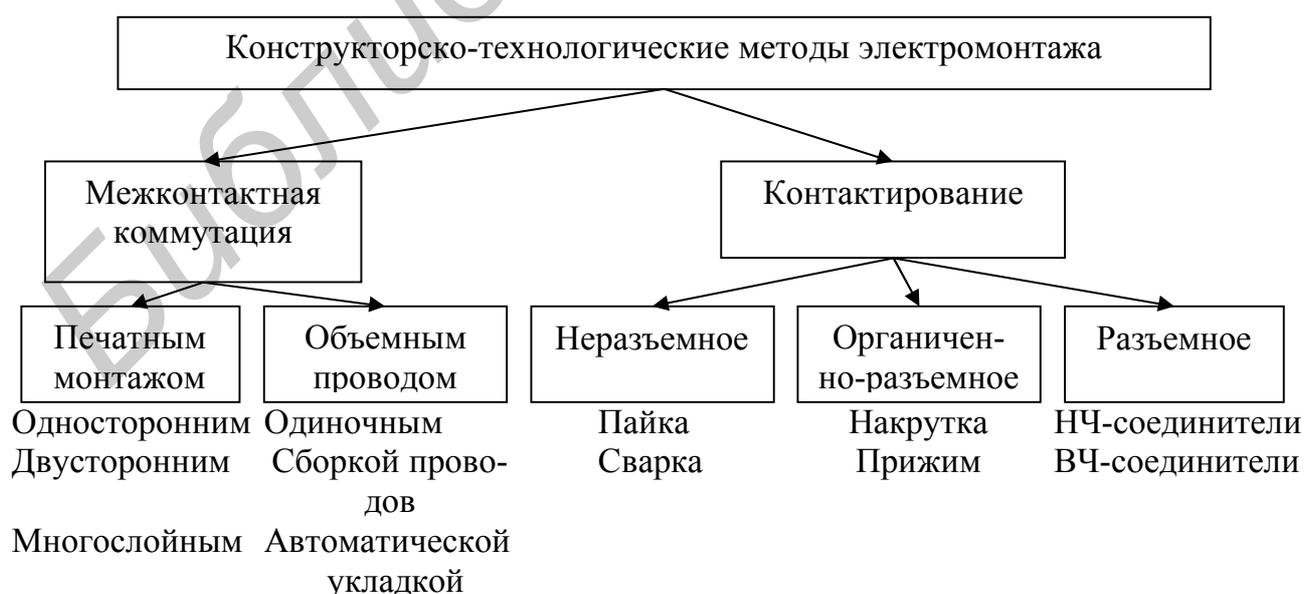


Рис. 4.1. Классификация методов электромонтажа

Эту классификацию методов электромонтажа можно было бы продолжить детализируя и далее разновидности вариантов исполнения. Например, печатные платы по виду основания могут быть диэлектрические (стеклопластик, полиимидная пленка, фторопласт, керамика) и металлические (сталь, алюминий, титан и др.). Есть много разновидностей печатных плат и по технологическому способу получения проводников.

4.2. Основные определения и типы печатных плат

Печатные платы (ПП) – основа печатного монтажа любой ЭА, при котором МС, полупроводниковые приборы, ЭРЭ и элементы коммутации устанавливаются на изоляционное основание с системой токопроводящих полосок металла (проводников), которыми они электрически соединяются между собой в соответствии с электрической принципиальной схемой.

Печатный монтаж – способ монтажа, при котором электрическое соединение элементов электронного узла, включая экраны, выполнено с помощью печатных проводников.

Печатный проводник – проводящая полоска в проводящем рисунке.

В ЭА применяют ПП практически на всех уровнях конструктивной иерархии:

на нулевом – в качестве основания ГИС и микросборок;

на первом и последующих – в качестве основания, механически и электрически объединяющего все элементы, входящие в схему электрическую принципиальную ЭА.

Государственным стандартом предусмотрены следующие типы ПП:

односторонняя печатная плата (ОПП) – ПП, на одной стороне которой выполнен проводящий рисунок (рис. 4.2, а);

двусторонняя печатная плата (ДПП) – ПП, на обеих сторонах которой выполнены проводящие рисунки и все требуемые соединения (рис. 4.2, б);

многослойная печатная плата (МПП) – ПП, состоящая из чередующихся слоев изоляционного материала с проводящими рисунками на двух или более слоях, между которыми выполнены требуемые соединения;

гибкая печатная плата (ГПП) – ПП, имеющая гибкое основание;

гибкий печатный кабель (ГПК) – система параллельных печатных проводников, размещенных на гибком основании.

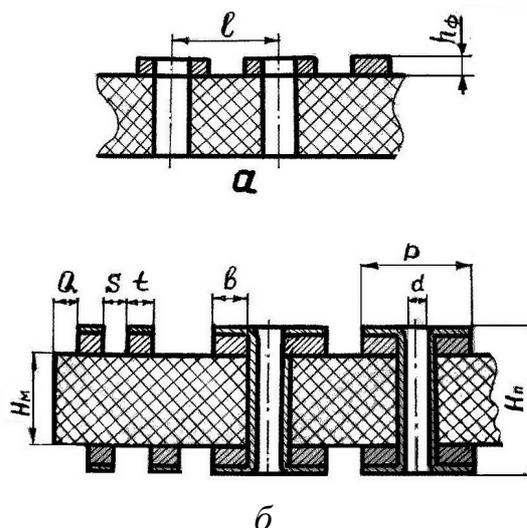


Рис 4.2. Основные типы печатных плат:
 а – односторонняя ПП; б – двусторонняя ПП

На рисунке приведены следующие обозначения:

t – ширина печатного проводника;

s – расстояние между печатными проводниками;

Q – расстояние от края ПП (выреза, паза) до элементов проводящего рисунка;

b – расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки (поясок);

D – диаметр контактной площадки;

d – диаметр отверстия;

h_{ϕ} – толщина фольги;

H_M – толщина материала основания печатной платы;

H_{II} – толщина ПП;

l – расстояние между центрами (осями) отверстий.

Проводящий рисунок – совокупность всех элементов на отдельном слое ПП, образованных проводящим материалом (печатные проводники, контактные площадки, концевые контакты печатного разъема и др.).

Перемычка ПП – отрезок проводникового материала, не входящий в рисунок ПП и обеспечивающий электрическое соединение между двумя точками проводящего рисунка на одной стороне ПП (устанавливается при невозможности выполнить соединение печатным проводником).

Разновидности отверстий на печатной плате – монтажные (могут быть металлизированными) и крепежные (для механического крепления ПП на шасси, для крепления разъемов и т.д.).

Каждое монтажное и переходное отверстие должно быть охвачено контактной площадкой.

4.3. Конструктивные характеристики печатных плат

По точности выполнения печатных элементов конструкции (проводников, контактных площадок и пр.) ПП делят на пять классов (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Наименьшие номинальные значения основных размеров элементов печатного монтажа для узкого места в зависимости от класса точности

Условные обозначения элементов печатного монтажа	Класс точности ПП				
	1	2	3	4	5
t, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
S, мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
b, мм	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025
$\gamma = d/H$	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20

1-й и 2-й классы ПП применяют в случае малой насыщенности поверхности ПП дискретными элементами и микросхемами малой степени интеграции. 3-й класс ПП используется для микросхем со штыревыми и планарными выводами при средней и высокой насыщенности поверхности ПП элементами. 4-й класс ПП применяется при высокой насыщенности поверхности ПП микросхемами с выводами и без них, 5-й класс ПП – при очень высокой насыщенности поверхности ПП элементами с выводами и без них.

Ширину печатных проводников рассчитывают и выбирают в зависимости от допустимой токовой нагрузки, свойств токопроводящего материала, температуры окружающей среды при эксплуатации. Края проводников должны быть ровными, проводники – без вздутий, отслоений, разрывов, пор, крупнозернистости и трещин, так как эти дефекты влияют на сопротивление и др.

Расстояние между элементами проводящего ресурса (например между проводниками) зависит от допустимого рабочего напряжения, свойств диэлектрика, условий эксплуатации и связана с помехоустойчивостью, искажением сигналов и короткими замыканиями.

Координатная сетка чертежа ПП необходима для координации элементов печатного рисунка (рис. 4.3).

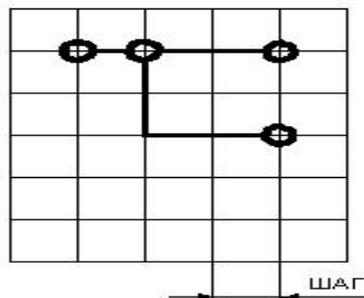


Рис 4.3. Координатная сетка чертежа печатной платы

В узлах пересечений сетки располагаются монтажные и переходные отверстия. Основным шагом координатной сетки принят размер 0,5 мм в обоих направлениях. Если этот шаг не удовлетворяет требованиям конкретной конструкции, можно применять шаг, равный 0,05 мм. При использовании МС и элементов с шагом выводов 0,625 мм допускается применение шага координатной сетки 0,625 мм. В случае необходимости применения координатной сетки с шагом, отличным от основных, предпочтительным является шаг, кратный основным шагам координатной сетки. При использовании микросхем зарубежного производства с расстояниями между выводами по дюймовой системе допускается использование шага координатной сетки, кратного 2,54 мм.

Диаметры монтажных и переходных отверстий должны соответствовать ГОСТ 10317-79 и выбираться из ряда 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 3,0 мм.

Монтажные отверстия предназначены для установки МС и ЭРЭ, а переходные отверстия – для электрической связи между слоями или сторонами ПП.

Размеры ПП, если они специально не оговорены в ТЗ, определяются с учетом количества устанавливаемых элементов, их установочных площадей, шага установки, зон установки разъема и пр. Линейные размеры ПП рекомендуется выбирать по ГОСТу (табл. 4.2). Соотношение линейных размеров сторон ПП должно составлять не более 3:1.

Таблица 4.2

Линейные размеры печатных плат

Ширина, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Длина, мм
1	2	3	4
20	30	90	90
	40		120
30	40		150
			170

Окончание табл. 4.2

1	2	3	4
40	60		
45	75	100	120
	80		130
50	60	110	150
	80		170
	100	120	120
150	140		
60	60	130	150
	80		160
	90		170
	100		180
	140		200
	160		200

75	75	140	150
	90		200
80	170	150	150,170,180,200
	130	160	170,200
	140	170	180,200,280
		200	360

4.4. Электрические характеристики печатных плат

Допустимая плотность тока для ОПП, ДПП и наружных слоев МПП 20 А/мм², для внутренних слоев МПП – 15 А/мм².

Допустимое рабочее напряжение между элементами проводящего рисунка, расположенными в соседних слоях ПП и ГПК, зависит от материала основания ПП и не должно превышать следующих значений (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Допустимые рабочие напряжения для материалов ПП

Расстояние между элементами рисунка, мм	Значение рабочего напряжения, В	
	Гетинакс фольгированный (ГФ)	Стеклотекстолит фольгированный (СФ)
От 0,1 до 0,2 включительно	-	25
Свыше 0,2 до 0,3 включит.	-	50
Свыше 0,3 до 0,4 включит.	75	100
Свыше 0,4 до 0,5 включит.	150	200
Свыше 0,5 до 0,75 включит.	250	350
Свыше 0,75 до 1,5 включит.	350	500
Свыше 1,5 до 2,5 включит.	500	650

Допустимые рабочие напряжения между элементами проводящего рисунка, расположенными на наружном слое ПП, зависят от материала основания ПП, условий эксплуатации и не должны превышать следующих значений (табл. 4.4).

Таблица 4.4

Допустимые рабочие напряжения между элементами проводящего рисунка на наружных слоях ПП

Расстояния между элементами проводящего рисунка, мм	Значения рабочего напряжения, В							
	Нормальные условия		Относ. влажн. 93 % при 40 °С		Пониженное атмосферное давление			
					53600 Па (400 мм рт. ст.)		666 Па (5 мм рт. ст.)	
	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ
0,1–0,2	-	25	-	15	-	20	-	10
0,2–0,3	30	50	20	30	25	40	20	30

0,3–0,4	100	150	50	100	80	110	30	50
0,4–0,7	150	300	100	200	110	160	58	80
0,7–1,2	300	400	230	300	160	200	80	100
1,2–2,0	400	600	300	360	200	300	100	130
2,0–3,5	500	830	360	430	250	400	110	160
3,5–5,0	660	1160	500	600	330	560	150	210
5,0–7,5	1000	1500	660	830	500	660	200	250
7,5–10	1300	2000	830	1160	560	1000	230	300
10,0–15,0	1800	2300	1160	1600	660	1160	300	330

4.5. Рельефные печатные платы

В РЭС для подвижных объектов получают распространение рельефные печатные платы (РП), получившие своё название из-за рельефной формы проводников, имеющих в сечении форму трапеции (рис. 4.4, а) и формируемых в объёме изоляционного основания платы.



Рис. 4.4. Элементы рельефной платы:
А – ПЕЧАТНЫЙ ПРОВОДНИК; Б – ОТВЕРСТИЕ

Такая конструкция печатного проводника существенно повышает надежность плат в эксплуатации и стойкость к перепайкам (до 50 перепаяек) за счет высокой прочности сцепления слоя меди с основанием. В таких платах металлизированные монтажные отверстия имеют форму сдвоенной воронки без цилиндрической части (рис. 4.4, б), что позволяет отказаться от контактных площадок.

Дорожки РП в 2–3 раза меньше по ширине по сравнению с обычным печатным проводником при одном том же сечении по меди. Отсутствие контактных площадок и малая ширина проводников позволяют изготавливать РП повышенной плотности монтажа, эквивалентные 5–14-слойным МПП, и размещать четыре проводника между отверстиями диаметром 0,8 мм и межцентровым расстоянием 2,5 мм.

Ортогональное расположение проводников на сторонах ДПП позволяет формировать переходные отверстия в любой точке пересечения трасс, что укорачивает электрические связи, снижает уровень помех и паразитные связи. Проектирование таких плат осуществляют с помощью САПР на базе пакетов прикладных программ САПР «RELEF» и др. [3].

Достоинства РП:

возможность осуществления сверхвысокой плотности монтажа ИМС и ЭРЭ;

высокий класс точности (4 или 5);

возможность использования технологии поверхностного монтажа;

сравнительно низкая трудоемкость проектирования за счет применения простого алгоритма трассировки;

высокая эксплуатационная надежность;

более низкая стоимость лучших по параметрам, чем стеклотекстолит, полимерных материалов основания (например эпоксидная пластмасса);

отсутствие экологически вредных технологических процессов нанесения рисунка и др.

4.6. Материалы оснований печатных плат

В качестве материалов оснований ПП используют:

фольгированные и нефольгированные диэлектрики (гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, стеклоткань, лавсан, полиимид, фторопласт и др.);

керамику;

металлические пластины.

При выборе материала основания ПП обращают внимание на следующие обстоятельства:

предполагаемые МВ (вибрации, удары и т.д.);

класс точности ПП (расстояние между проводниками);

условия эксплуатации;

стоимость и др.

Выбор материала основания ПП рекомендуется осуществлять в соответствии с ОСТ 4.010.022-85.

Таблица 4.5

Некоторые материалы основания для ОПП и ДПП

Материал	Марка	Толщина, мм
ГФ ГФ с гальваностойкой фольгой	ГФ-1-35	1,0;
	ГФ-1-35Г	1,5;
	ГФ-2-35Г	2,0;
	ГФ-1-50Г	2,5;
	ГФ-2-50Г	3,0
СФ СФ с гальваностойкой фольгой	СФ-1-35	0,5; 1,0;
	СФ-2-35	1,5; 2,0;
	СФ-1-50	2,5; 3,0
	СФ-2-50	
Стеклотекстолит тепло-стойкий фольгированный с гальваностойкой фольгой	СТФ-1-35	0,08; 0,1;
	СТФ-2-35	0,13; 0,15;
	СТФ-1-18	0,2; 0,25;

	СТФ-2-18	0,3; 0,35; 0,5; 0,8; 1; 1,5; 2; 2,5; 3
--	----------	----------------------------------------------

Диэлектрическое основание платы представляет собой обычно бумажную (гетинаксы) или текстильную (текстолиты) основу, пропитанную фенольной либо эпоксидной смолой.

Преимущество гетинаксов в том, что они легко поддаются механической обработке, что важно при серийном и массовом производстве РЭС. Их недостаток – повышенная чувствительность к влажности и нестабильность размеров (прогибы и др.).

В стеклотекстолитах в качестве основы используют стеклоткань, пропитанную эпоксидной смолой. Этот материал более качественный, чем гетинакс, но более дорогой и труднообрабатываемый (быстро затупляет острые кромки инструментов – сверла и т.д.).

Фольгированные диэлектрики – электроизоляционные основания, плакированные (покрытые) обычно медной фольгой с оксидированным гальваностойким слоем, прилегающим к электроизоляционному основанию. Они могут быть односторонними и двусторонними.

Нефольгированные диэлектрики, предназначенные для аддитивного метода производства плат, имеют на поверхности специально нанесенный адгезивный слой, который служит для лучшего сцепления химически осаждаемой меди с диэлектриком.

По сравнению с гетинаксами стеклотекстолиты имеют лучшие механические и электрические характеристики, более высокую нагревостойкость, меньшее влагопоглощение. Недостатки стеклотекстолитов: худшая механическая обрабатываемость, более высокая стоимость, существенное различие (приблизительно в 10 раз) коэффициента теплового расширения меди и стеклотекстолита в направлении толщины материала, что может привести к разрыву металлизации в отверстиях при пайке или в процессе эксплуатации.

В качестве материалов основания для МПП также используют различные диэлектрические материалы – стеклотекстолит, полиимид, стеклоткань прокладочную и др.

Для изготовления ГПП и ГПК используют фольгированный лавсан, фторопласт, полиимид и др. ДПП на металлическом основании с нанесенным на него электроизоляционным покрытием применяются, когда нужно обеспечить отвод тепла при размещении на плате тепловыделяющих ЭРЭ, полупроводниковых приборов и ИМС большой мощности. Их другое достоинство – большая механическая прочность.

При повышенных требованиях к стабильности параметров используют керамические платы. На поверхность таких плат наносят проводящие и резистивные пасты и вжигают их при $t = 600 \dots 700 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.7. Печатный монтаж и методы его получения

Печатный монтаж может быть реализован на различных материалах и различными технологическими способами (рис. 4.5).



Рис. 4.5. Способы получения проводников

Из субтрактивных методов наибольшее применение нашли химический негативный и комбинированный позитивный. Первый используется для получения односторонних печатных плат, внутренних слоев многослойных печатных плат и гибких печатных шлейфов. Его достоинство – высокая точность геометрии проводников из-за отсутствия процессов гальванического осаждения меди. Вторым методом получают двусторонние печатные платы (ДПП) и многослойные печатные платы (МПП) из фольгированного травящегося диэлектрика. Способность диэлектрика к подтравливанию особенно важна для МПП, где от этого зависит надёжность межслойных соединений. ДПП выполняются без использования травящегося диэлектрика.

Рассмотрим в качестве примера последовательность основных операций изготовления ПП химическим негативным методом (рис 4.6).

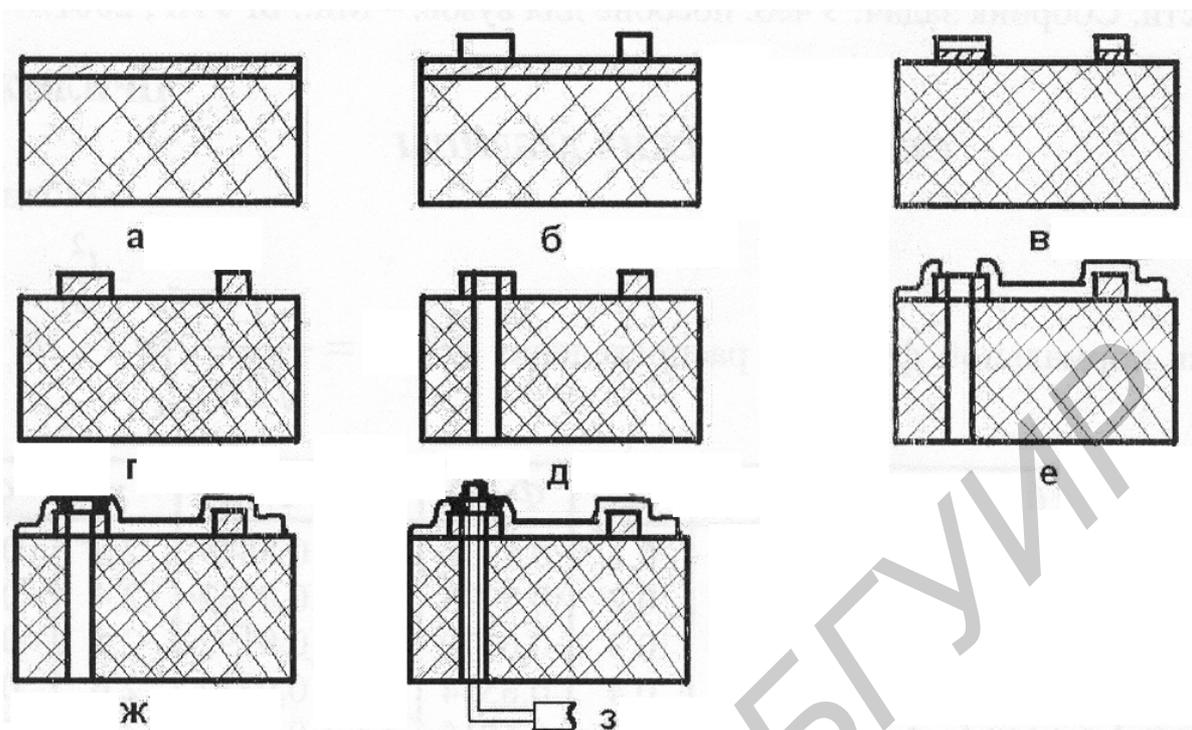


Рис. 4.6. Основные операции изготовления печатных плат химическим негативным методом:

а – заготовка из фольгированного диэлектрика; б – нанесение фоторезистивного печатного рисунка; в – травление печатного рисунка; г – удаление фоторезиста; д – механическая обработка монтажных отверстий; е – нанесение лаковой (эпоксидной) маски; ж – облуживание контактных площадок; з – пайка выводов ЭРЭ и других элементов

Технология формирования печатного рисунка обычно осуществляется с использованием процесса фотолитографии и веществ, обладающих специальными свойствами – фоторезистов.

Фоторезисты – вещества, устойчивые к агрессивному воздействию кислот и щелочей, предназначенные для защиты отдельных участков фольги печатной платы и изменяющие свои свойства под воздействием ультрафиолетового излучения. Технологический процесс получения контактной маски на поверхности печатной платы с помощью фоторезиста называется фотолитографией.

В зависимости от механизма протекающих в фоторезисте реакций фоторезисты бывают позитивные и негативные. При облучении негативного фоторезиста через фотошаблон в нём протекают реакции, приводящие к потере фоторезистом растворимости. После обработки в соответствующих растворителях на плате остается рисунок печатной платы, негативный по отношению к фотошаблону (рис. 4.7).

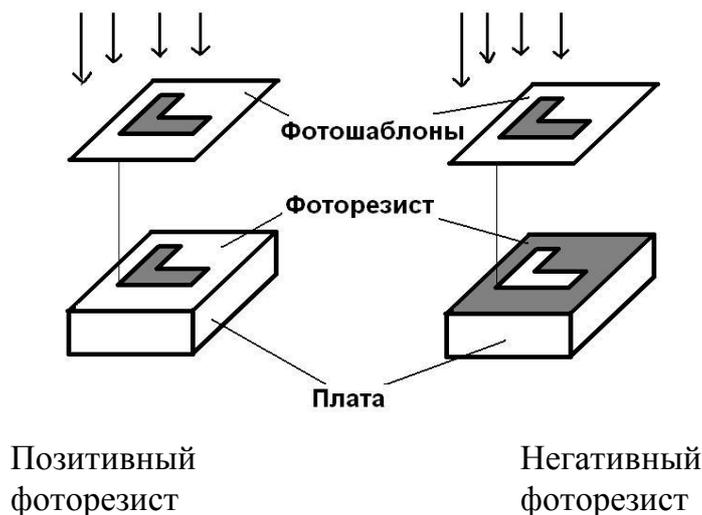


РИС. 4.7. ФОРМИРОВАНИЕ ФОТОРЕЗИСТИВНОЙ МАСКИ

4.8. Односторонние, двусторонние и многослойные печатные платы

Таблица 4.6

Схемы сечений ОПП и ДПП

Тип платы	Вид платы	Схема сечения	Обозначения
ОПП	Без металлизации отверстий		1 – диэлектрическое основание; 2 – проводящий рисунок;
	С металлизацией отверстий		3 – отверстие; 4 – металлизация отверстия
ДПП	На диэлектрическом основании		1 – основание; 2 – проводящий рисунок; 3 – отверстие;
	На металлическом основании		4 – контактная площадка; 5 – электроизоляционное покрытие.

ОПП содержат один слой проводящего рисунка и имеют следующие достоинства:

высокая точность выполнения проводящего рисунка;

отверстия можно использовать и без металлизации;

возможность установки ЭРЭ, ПП и ИМС на поверхность платы без дополнительного изоляционного покрытия;

относительно низкая стоимость.

ДПП требует металлизации монтажных и переходных отверстий, что усложняет технологию изготовления (два этапа меднения – химическое, а затем и гальваническое).

Для металлизации отверстий могут быть использованы пистоны с последующей их зенковкой.

Печатные платы с металлизированными отверстиями более надежны в эксплуатации, так как обеспечивается лучшее сцепление навесных ИМС и ЭРЭ с печатными проводниками и с основанием платы.

ДПП на металлическом основании с нанесенным на него электроизоляционным покрытием применяются, когда нужно обеспечить отвод тепла при размещении на плате тепловыделяющих ЭРЭ и полупроводниковых приборов большой мощности.

МПП имеют много разновидностей. Например, МПП со сквозными металлизированными отверстиями представляют собой чередование проводящих и склеивающих диэлектрических слоев. Применяются для установки элементов, как с планарными, так и со штыревыми выводами. Они обеспечивают более плотный монтаж.

4.9. Методы конструирования печатных плат

Конструирование печатных плат осуществляют ручным, полуавтоматизированным и автоматизированным методами.

При ручном методе конструирования размещение элементов на печатной плате и трассировку печатных проводников осуществляет непосредственно конструктор. При использовании данного метода рекомендуется следующий порядок организации работы. Принципиальная электрическая схема разбивается на функционально связанные группы, и производится размещение навесных элементов в каждой группе. Группа элементов, имеющая наибольшее количество внешних связей, размещается вблизи разъема. Группа элементов, имеющая наибольшее количество связей с уже размещенной группой навесных элементов, размещается рядом и т. д. При необходимости производится корректировка в размещении отдельных навесных элементов или допустимая замена адресов связей.

При размещении элементов на поверхности печатной платы в ряде случаев необходимо учитывать ещё ряд ограничений: размещение массивных элементов на поверхности платы при предполагаемой эксплуатации изделия в условиях механических воздействий; взаимное размещение тепловыделяющих элементов и элементов, параметры которых могут изменяться при изменении температуры в широком диапазоне; взаимное размещение элементов для предотвращения возникновения паразитной связи между ними и т.д. Все эти обстоятельства должны учитываться конструктором на возможно ранней стадии проектирования для исключения переделок при наладке или испытаниях изделия.

Полуавтоматизированный метод конструирования предусматривает, например, размещение навесных элементов с помощью ЭВМ при ручной трассировке печатных проводников. Метод обеспечивает ускорение процесса проектирования.

Автоматизированный метод конструирования предусматривает кодирование исходных данных, размещение навесных элементов и трассировку печатных проводников с использованием ЭВМ.

Проектирование топологии проводящего рисунка печатной платы выполняется средствами интегрированной САПР PCAD версий 4.5 или 8.5. Результатом этого этапа является интегральный образ печатной платы, который может непосредственно использоваться в «безбумажном» производстве узла, но как конструктивный документ не соответствует требованиям ЕСКД.

Довести результат проектирования до состояния конструкторского документа можно, выполнив следующую стадию проекта. Переход к этой стадии требует конверсии данных из формата «электронной» САПР PCAD в формат «конструкторской» САПР AutoCAD. Конвертированный образ печатного узла подвергается обработке, в результате которой создаются рабочие конструкторские документы в соответствии с требованиями ЕСКД [1].

4.10. Последовательность процесса конструирования печатных плат

Рекомендуется следующий порядок конструирования плат:

изучение технического задания на изделие, в состав которого входит печатная плата;

определение условий эксплуатации и группы жесткости;

выбор типа и класса точности;

выбор размеров и конфигурации;

выбор материала основания;

выбор конструктивного покрытия;

размещение навесных элементов и трассировка печатных проводников;

выбор метода маркировки и ее расположения;

разработка конструкторской документации.

Условия эксплуатации, хранения и транспортирования определяют на основании требований ТЗ на изделие, в состав которого входит печатная плата.

В зависимости от условий эксплуатации в соответствии с ГОСТ 23752-79 определяют группу жесткости, предъявляющую соответствующие требования к конструкции печатной платы, к используемому материалу основания и необходимости применения дополнительной защиты от климатических, механических и других видов воздействий. Эти требования записывают в технических требованиях на поле чертежа печатной платы.

4.11. Конструктивные покрытия

Конструктивные покрытия необходимы для обеспечения стабильности электрических, механических и других параметров ПП. Покрытия могут быть металлические и неметаллические (табл. 4.7).

Таблица 4.7

Материал покрытия	Толщина, мкм	Назначение покрытия
Сплав Розе	1,5...3	Защита от коррозии, обеспечение паяемости
Сплав олово–свинец	9...15	Защита от коррозии, обеспечение паяемости
Серебро	6...12	Улучшение электрической проводимости
Золото и его сплавы	0,5...3,0	Улучшение электрической проводимости, снижение переходного сопротивления, повышение износоустойчивости
Палладий	1...1,5	Снижение переходного сопротивления, повышение износоустойчивости контактов переключателей
Никель	3...6	Защита от коррозии, повышение износоустойчивости контактов переключателей
Медь	25...30	Обеспечение электрических параметров соединения

Неметаллические конструктивные покрытия используются для защиты: печатных проводников и поверхности основания печатной платы от воздействия припоя;

элементов проводящего рисунка от замыкании навесными элементами; от влаги при эксплуатации.

Используемые диэлектрические покрытия: эпоксидные смолы, эмали, оксидные пленки.

4.12. Выбор и размещение отверстий

Количество типоразмеров любых отверстий на печатной плате следует ограничивать. Рекомендуется применять не более трех типоразмеров монтажных и переходных отверстий.

Центры отверстий располагают в узлах координатной сетки. Основным шагом координатной сетки принят размер 0,5 мм. Центры монтажных отверстий под неформуемые выводы многовыводных элементов, межцентровые расстояния которых не кратны шагу координатной сетки, следует располагать так, чтобы в узле координатной сетки находился центр по крайней мере одного из монтажных отверстий, а центры отверстий под остальные выводы располагались в соответствии с требованиями конструкций устанавливаемых элементов с указанием необходимых размеров (рис. 4.8).

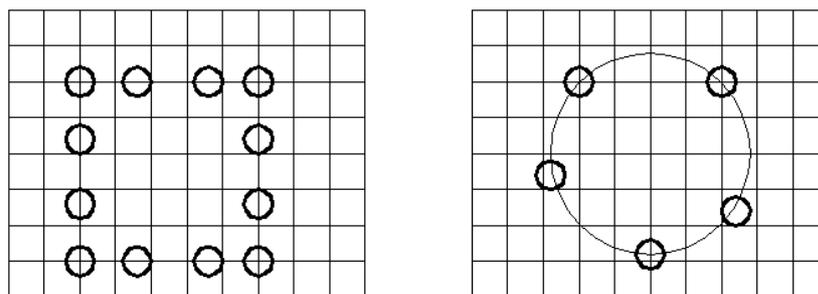


Рис. 4.8. Расположение центров отверстий на координатной сетке ПП

Неметаллизированные монтажные отверстия следует располагать в зоне контактной площадки или, в необходимых случаях, – рядом с ней.

Диаметр монтажного отверстия выбирают в пределах 0,4...3,0 мм, и его конкретное значение зависит от диаметра вывода навесного элемента.

Слой металла на поверхности печатной платы, сформированный в определенном месте, может выполнять функцию экрана между элементами устройства. Этот слой металла может занимать большую площадь платы, и при групповой пайке, например, волной припоя, возможно газовыделение из диэлектрика и отслаивание слоя металлизации. Чтобы исключить этот негативный эффект, экраны выполняют с вырезами, равномерно распределенными по площади экрана (рис. 4.9). Обычно площадь вырезов должна составлять не менее 50 % от общей площади экрана.

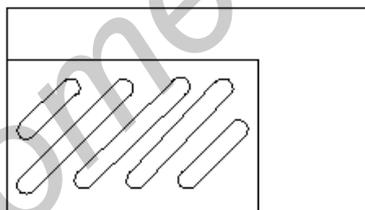


Рис. 4.9. Печатный экран с вырезами

4.13. Маркировка печатных плат

Маркировка, наносимая на печатную плату, подразделяется на основную и дополнительную. Основная маркировка наносится обязательно и должна содержать:

- обозначение печатной платы или ее условный шифр;
- порядковый номер изменения чертежа, относящийся только к изменению проводящего рисунка;
- буквенно-цифровые обозначение в слоях МПП.

Дополнительная маркировка наносится при необходимости и может содержать:

- порядковый или заводской номер ПП или партии ПП;
- позиционное обозначение навесных элементов;

цифровое обозначение первого вывода навесного элемента, точек контроля; обозначение положительного вывода полярного элемента (знак «+»).

Основная маркировка может выполняться способом, которым выполняется проводящий рисунок.

Дополнительная маркировка обычно выполняется краской.

4.14. Межконтактные соединения из объемного провода

Электрические соединения из объемного провода обладают худшими массогабаритными и экономическими показателями по сравнению с печатным монтажом. Однако они широко используются в опытном производстве, для выполнения навесных электрических соединений в ИС (для соединения контактных площадок ИС с внешними выводами), для осуществления длинных или высокочастотных связей и т.д.

Номенклатура объемных проводов:

одножильные без изоляции (золотые, алюминиевые, медные, медные луженые);

одножильные и многожильные с изоляцией (волокнистой, пластмассовой, резиновой, лаковой);

экранированные;

коаксиальные кабели;

многожильные кабели (опрессованные, тканые, клееные, собранные и увязанные в круглый жгут).

Провода без изоляции используют в основном для электрических соединений ИС и микросборок.

Золотая проволока хорошо поддается пайке и сварке, совместима практически со всеми материалами контактных площадок, дорогая и прочная.

Провода из алюминия и его сплавов более дешевы, совместимы с алюминиевыми контактными площадками, но менее прочны в зоне контакта.

Для золотых проводов используется в основном термокомпрессионная сварка, а для алюминиевых – ультразвуковая.

Провода с изоляцией используют для реализации электрических соединений в пределах платы, блока, шкафа наряду с печатным монтажом.

В ряде случаев монтаж объемными проводниками экономичнее, чем с помощью печатных плат (например, если плата большая и насыщенная, а монтаж объемным проводом выполняется автоматизированным методом). Электрические соединения объемным проводом позволяют вносить изменения и облегчают ремонт, но затрудняют воспроизводимость параметров электрических связей (волнового сопротивления, паразитных параметров). Провода могут быть одножильные и многожильные. В первом случае контакт осуществляется накруткой (рис. 4.10), во втором – пайкой.

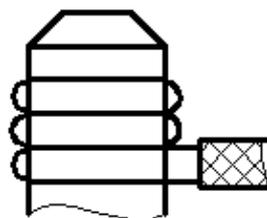


Рис. 4.10. Монтаж накруткой

Для осуществления такого монтажа используют изолированные провода с медной посеребренной жилой диаметром 0,16...0,5 мм. При ручной работе производительность монтажа до 174 соед./ч, при автоматической – до 1000 соед./ч.

Недостатком метода является большой объем контактного узла (необходимо 4–6 витков на одном штыре), что также ухудшает частотные характеристики узла. Контактные штыри располагают с шагом 2,5 и 1,25 мм. Минимальное сечение штырей 0,3 x 0,3 мм.

При монтаже РЭС также широко используются плоские кабели. Они обладают высокой стабильностью электрических параметров, хорошим теплоотводом. Разновидности плоских кабелей (рис. 4.11): клееные (а), опрессованные (б), плетеные (в).

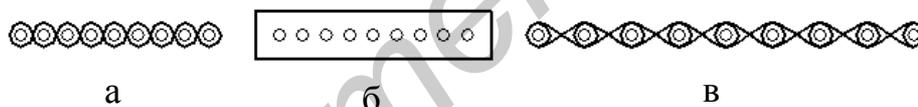


Рис. 4.11. Плоские кабели

5. КОМПОНОВКА И ЭРГНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЭС

Для ускорения разработки РЭС, повышения надежности и качества аппаратуры разрабатывают компоновочные эскизы (чертежи) и определяют численные значения компоновочных характеристик.

Компоновка представляет собой размещение элементов РЭС в пространстве или на плоскости. Задача компоновки – выбор форм, основных геометрических размеров, ориентировочное определение массы и расположения в пространстве составных элементов изделия.

Имея компоновочный эскиз изделия и схему электрическую принципиальную, можно до разработки рабочих чертежей и изготовления макета оценить возможный характер и уровень паразитных связей, оценить тепловые режимы и т.д.

5.1. Требования к компоновочным решениям

Конструктор должен искать компоновочные решения, которые удовлетворяют следующим требованиям:

- 1) отсутствие между отдельными элементами, узлами и блоками существенных паразитных электрических и магнитных взаимосвязей, влияющих на технические характеристики изделия;
- 2) минимизация влияния тепловых и механических воздействий на изменение технических характеристик изделия;
- 3) взаимное расположение элементов конструкции, обеспечивающее технологичность сборки и монтажа с учетом использования автоматического и полуавтоматического оборудования, легкий доступ к деталям для контроля, ремонта и обслуживания;
- 4) расположение и конструкция органов управления и настройки, обеспечивающие максимальные удобства для оператора;
- 5) изделия должны удовлетворять требованиям технической эстетики;
- 6) габариты и масса изделия должны быть минимальными.

В отношении последнего требования следует отметить, что габариты и масса изделия в значительной мере зависят от принятых схемных решений и используемых радиоэлементов. Так, например, переход в телевизионных приемниках от источников электропитания с трансформаторным входом к импульсным источникам электропитания, работающим на повышенных частотах (20–100 кГц вместо 50 Гц), позволил снизить удельные показатели источника электропитания по массе и объему примерно в два раза. Мерой эффективности мероприятий по уменьшению габаритов аппаратуры является плотность монтажа – среднее количество ЭРЭ, полупроводниковых приборов, умещающихся в единице объема.

Удовлетворить одновременно всем перечисленным требованиям в большинстве случаев не удастся. Поэтому процесс компоновки, как и всякий процесс конструирования, сводится к нахождению компромиссного оптимального решения. Для компоновки широко используются САПР. Процесс же трассировки печатных плат полностью автоматизирован.

5.2. Способы выполнения компоновочных работ

В практике проектирования РЭС используются следующие виды компоновки:

- аналитическая;
- номографическая;
- аппликационная;
- модельная;
- графическая;
- натурная;
- с использованием ЭВМ.

При аналитической компоновке оперируют численными значениями различных компоновочных характеристик: геометрическими размерами, объемом, массой. По известным компоновочным характеристикам элементов вычисляют компоновочные характеристики изделия в целом.

При номографической компоновке используют специально разработанные номограммы, упрощающие вычисления.

Аналитическая и номографическая компоновки выполняются по перечням элементов принципиальных схем. Они не обладают наглядностью и не дают возможность получить пространственные компоновочные эскизы.

Аппликационная компоновка позволяет получить наглядный компоновочный эскиз. Элементы выполняются в виде аппликаций и размещаются на заданной плоскости или в объеме.

При модельной компоновке используют упрощенные модели ЭРЭ, полупроводниковых приборов и ИМС, выполненные из бумаги, картона и других материалов, размещаемые затем на плоскости или объеме.

При графической компоновке используются упрощенные способы изображения элементов. Для наглядности могут выделяться цветом элементы различных типов.

При натурной компоновке используются реальные компоненты изделия. Их размещают на плоскости в необходимом порядке. После достижения удобного расположения элементов места их установки фиксируют и выполняют монтажный и компоновочный эскизы.

Наиболее перспективный способ выполнения компоновки РЭС – с использованием ЭВМ. Проектирование объемных элементов конструкции модуля РЭС, моделирование их взаимного расположения и взаимодействия при сборке, разборке и в эксплуатации выполняется средствами САПР объемного художественного конструирования 3D Studio или ее развития 3D Studio MAX, работающей в операционной среде Microsoft Windows.

Результатом такого проектирования является комплект конструкторской документации, файлы управляющей информации для автоматизированного производственного оборудования, а также видеоролик или комплект видов модуля, исполненного в материалах, имеющих нужный цвет, фактуру, освещенного расположенными в окружающем его пространстве источниками света с заданными свойствами [1].

5.3. Факторы, определяющие эффективность деятельности оператора

Удобное рабочее место и удобный инструмент повышают производительность труда. Если наблюдается обратное, то повышается утомляемость человека, растет число ошибок, возможны травмы.

Установлением взаимосвязи параметров человека и машины (пульта управления) занимается эргономика и ее раздел – инженерная психология. Человек, машина и среда рассматриваются в эргономике как сложное функциональное целое, в котором ведущая роль принадлежит человеку.

Основные факторы, определяющие эффективность деятельности оператора, приведены ниже.

- 1) Общие факторы:
окружающая среда;
компоновка рабочего места;
личные качества оператора.
- 2) Факторы, определяющие время считывания информации:
тип индикации (цифровой или стрелочный);
количество индикаторов;
размещение индикаторов.
- 3) Факторы, определяющие распознавание:
читаемость букв, цифр, знаков;
световые характеристики;
цветовой тон и цветовые контрасты.
- 4) Факторы, определяющие время работы:
количество органов управления;
тип органов управления, удобство размещения;
совместимость двигательных операций.
- 5) Факторы, определяющие время оценки информации:
объем информации;
динамика смены информации.

5.4. Эргономические показатели качества конструкции

Таких показателей несколько:

гигиенические (освещенность, вентилируемость, температура, токсичность, шум, вибрация, напряженность электрического и магнитного полей);
антропометрические – соответствие конструкции изделия размерам и форме тела человека и его частей (ног и рук), входящих в контакт с изделием;
физиологические и психофизиологические (соответствие конструкции изделия силовым, скоростным, зрительным возможностям человека);
психологические (соответствие конструкции изделия возможностям восприятия и переработки информации, закрепленным и вновь формируемым навыкам человека).

Вопросами реализации требований эргономики художественными средствами занимается такая отрасль, как дизайн или техническая эстетика.

5.5. Принципы организации и компоновки рабочего места

Рабочее место – зона, оснащенная необходимыми техническими средствами. Надежность работы оператора зависит от оптимальных значений гигиенических параметров окружающей среды. Эти параметры в общем случае могут быть комфортными, некомфортными и невыносимыми (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Некоторые гигиенические параметры

Параметры	Условия		
	комфортные	некомфортные	невыносимые
Температура, °С			
тепло	+22...+24	+35...+44	Выше +44
холод	+18...+22	-1	Ниже -1
Шум, дБ	40...50 (лаборатория) 80...90 (производств. цех)	120	130...135
Влажность, %	20...60	10	Ниже 10

Между комфортными и некомфортными условиями существует психологическая граница, а между некомфортными и невыносимыми – физиологическая.

Важное значение в организации рабочего места имеет его цветовое оформление. С помощью зрения человек получает 80–90 % всей информации. Цвет ассоциируется у человека с понятием тепла и холода, приближения и отдаления, легкости и тяжести (рис 5.1).

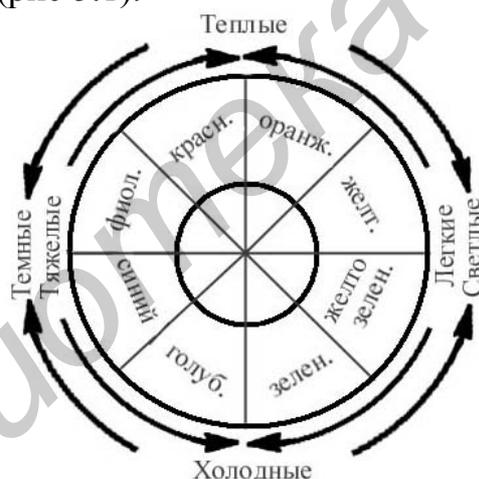


Рис. 5.1. Цветовой круг

Оптимальная яркость фона, при которой отмечается наибольшая разрешающая способность зрения, 10^4 кд/м².

Наибольшей разрешающей способностью по цвету отличаются следующие комбинации при восприятии знаков:

- синий на белом;
- черный на желтом;
- зеленый на белом;
- черный на белом;
- зеленый на красном;
- красный на желтом.

Реакция глаз характеризуется также полем зрения, остротой зрения, аккомодацией и другими параметрами. Рассмотрим в качестве примера поле зрения (рис. 5.2).

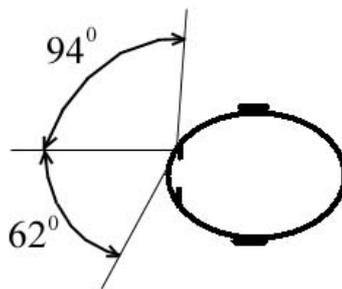


Рис 5.2. Поле зрения человека по горизонталям

Органы управления и индикации должны располагаться в поле зрения обоих глаз. При установке органов управления в паре с индикатором необходимо управляющее устройство располагать так, чтобы руки оператора не заслоняли индикатор, т.е. органы управления должны быть расположены ниже индикатора, связанного с ним, или справа от него.

Лицевые панели, например, измерительных приборов окрашивают обычно синтетическими эмалями МЛ-12 различных цветов (светло-бежевый, дымчатый, серый, серо-голубой и др.).

Для внешних установочных элементов рекомендуются цвета: серый, белый, черный. Надписи и символы на передних панелях и внешних устройствах выполняют: черным, белым, красным, желтым, зеленым, синим, но рекомендуется использовать не более пяти цветов в одном приборе.

Надписи должны состоять из терминов, утвержденных соответствующим ГОСТом. Выполняются надписи и символы гравировкой, офсетной печатью или сеткографией. Надписи располагаются над элементами или недалеко от них. Заводской номер и год изготовления следует наносить на задней панели в левом верхнем углу.

Размещение органов управления и индикации должно производиться по следующим правилам:

- по функциям;
- по важности;
- по удобству пользования;
- по последовательности пользования;
- по частоте пользования.

При компоновке панели соблюдают следующие правила:

зрительный обзор панели должен создаваться основными функционально-конструктивными элементами, не должно быть лишних элементов, надписей, линий и др.;

композиционная упорядоченность требует размещать внешние установочные изделия по четкой системе перпендикуляров и параллелей;

органы управления и индикаторы должны быть расположены соответственно последовательности пользования: слева направо при расположении в одну линию по горизонтали и сверху вниз при размещении в одну линию по вертикали.

5.6. Оформление лицевых панелей

Компоновку лицевой панели следует начинать с анализа работы оператора с прибором. Для этого графически изображают все элементы панели и устанавливают взаимосвязь между ними и оператором.

Рабочие операции необходимо распределить между правой и левой рукой оператора. Для правой руки выделить органы управления, связанные с наиболее ответственными и точными операциями. Количество и траектории рабочих движений должны быть сокращены до минимума.

При размещении внешних установочных изделий следует выполнять общее правило: органы индикации располагают вверху, органы управления – в средней части и органы подключения – внизу лицевой панели.

Наружные размеры конструкций, а также расстояния между установочными изделиями приборов (кнопками, тумблерами, ручками настройки) должны обеспечивать удобство осуществления переключений и настройки.

6. ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ РЭС ОТ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

6.1. Классификация дестабилизирующих факторов

РЭС эксплуатируются в помещениях, на открытом воздухе, на различных подвижных объектах и т.д. При эксплуатации они подвергаются воздействию внешних и внутренних дестабилизирующих факторов (рис. 6.1).

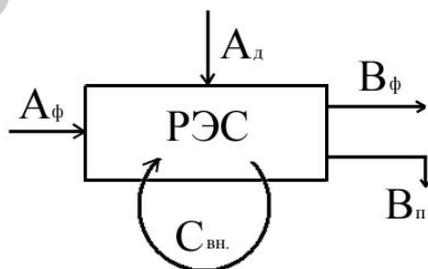


Рис. 6.1. РЭС при воздействии внешних и внутренних дестабилизирующих факторов:

A_{ϕ} – функционально обусловленное входное воздействие (входной сигнал);
 $A_{д}$ – внешнее дестабилизирующее воздействие; B_{ϕ} – функционально обусловленный выходной сигнал; $B_{п}$ – паразитное выходное воздействие (температура, шум и т.д.); $C_{вн.}$ – паразитное внутреннее воздействие РЭС на его же элементы

Классификация дестабилизирующих факторов, воздействующих на аппаратуру при различных условиях эксплуатации и на различных объектах, представлена на рис 6.2.

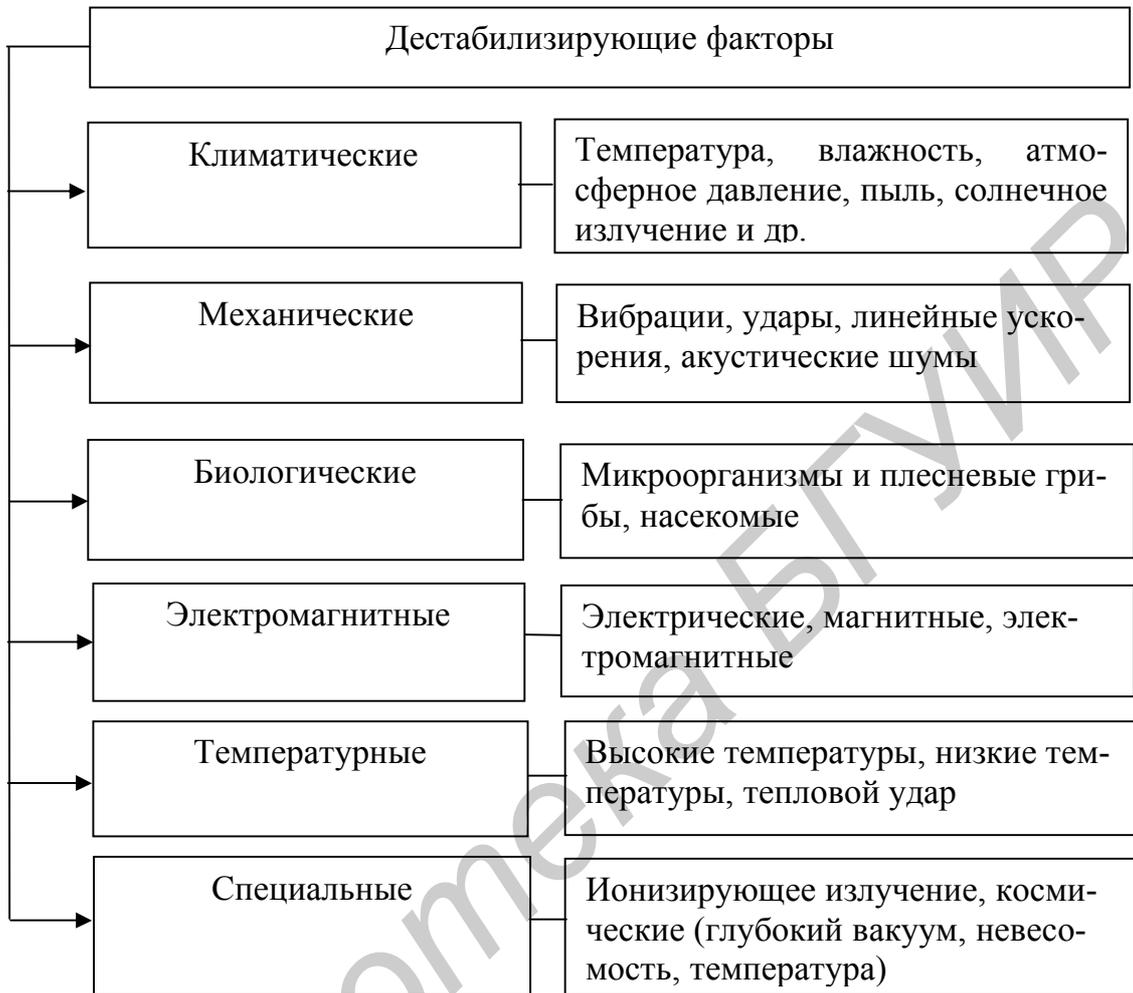


Рис. 6.2. Классификация дестабилизирующих факторов

6.2. Механические воздействия

Наиболее употребительной является следующая классификация механических воздействий:

- вибрации;
- удары;
- линейные нагрузки;
- акустические шумы;
- комплексные воздействия.

Вибрации в свою очередь могут быть гармоническими, негармоническими, периодическими, случайными (рис. 6.3).

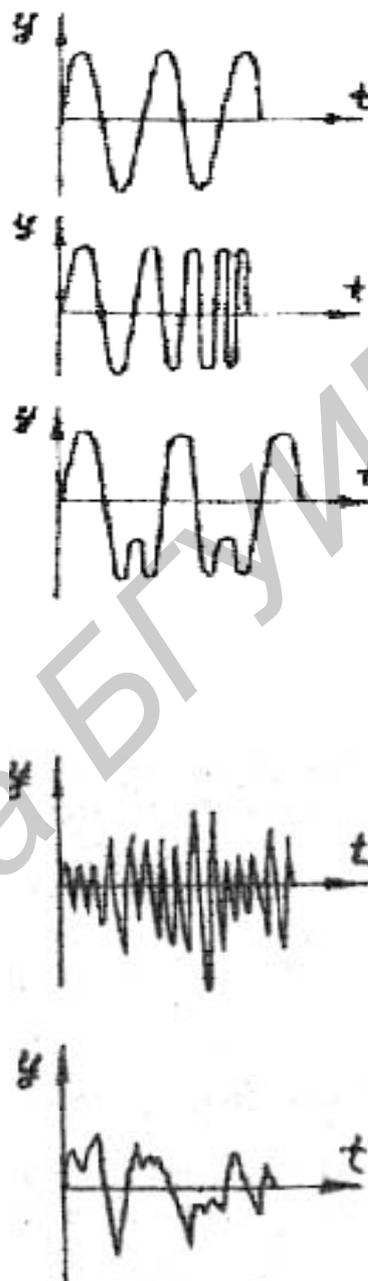
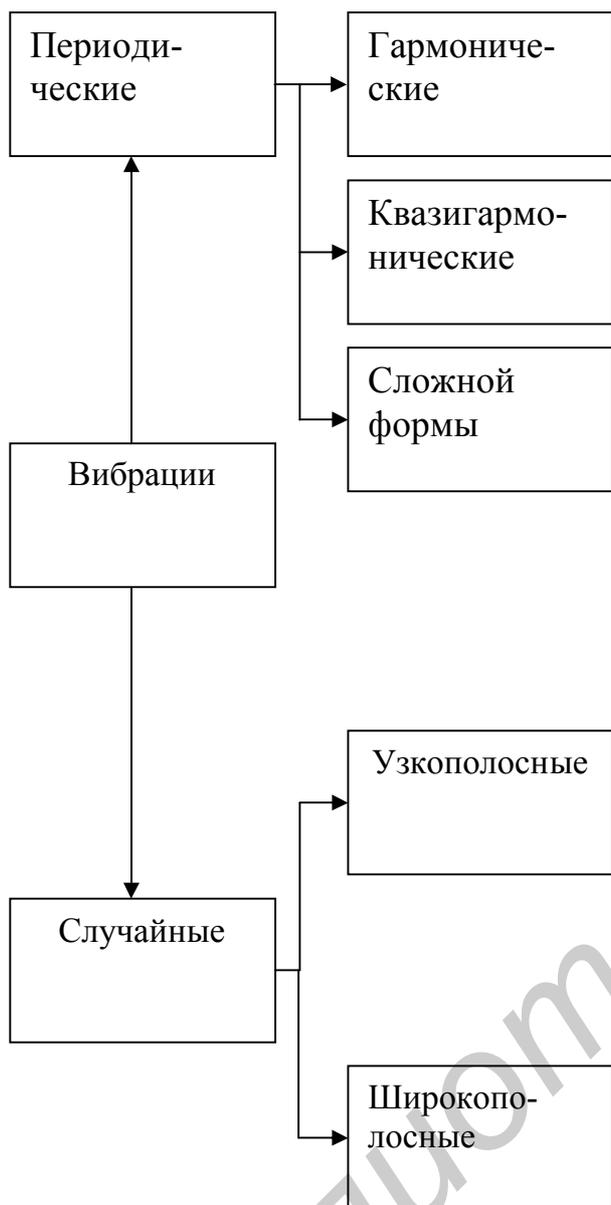


Рис. 6.3. Разновидности вибраций

Ударные нагрузки на аппаратуру могут воздействовать не только при ее эксплуатации на подвижных объектах, но и при транспортировании, при погрузочно-разгрузочных работах.

Линейные нагрузки возникают при разгоне и торможении транспортных средств, изменении направления движения.

Акустические шумы возникают при работе мощных двигателей (особенно реактивных), а также из-за возникающих аэродинамических эффектов при движении самолетов или ракет в достаточно плотных слоях атмосферы.

Комплексные воздействия – это комбинация из первых четырех вышеназванных. Это, например, может быть одновременное воздействие на аппаратуру

вибраций и ударов, вибраций и линейных нагрузок и т.д. Подобные воздействия наиболее часто встречаются в реальных условиях эксплуатации, но их и наиболее трудно воспроизводить в лабораторных условиях при испытаниях аппаратуры.

6.2.1. Параметры гармонических вибраций

Гармонические вибрации редко встречаются на подвижных объектах в чистом виде, однако их широко используют при анализе отклика конструкции на механическое воздействие, при проведении испытаний аппаратуры и, кроме того, любой сложный периодический колебательный процесс можно представить в виде суммы более простых – гармонических. Гармонические вибрации характеризуются амплитудой, периодом колебаний или частотой.

Кроме того, для характеристики гармонического вибрационного процесса используются понятия виброскорости и виброускорения. Если гармоническая вибрация описывается выражением

$$y = A \sin \omega t = A \sin 2\pi f t,$$

где y – смещение колеблющегося объекта;

A – амплитуда вибрации;

t – текущее время;

f – $\omega / 2\pi$ – частота,

то виброскорость можно определить как первую производную по времени от вибросмещения y :

$$y' = A\omega \cos \omega t = A2\pi f \cos 2\pi f t.$$

Амплитуда виброскорости

$$V = A\omega = A2\pi f.$$

Виброускорение определяется как первая производная от виброскорости или вторая производная от вибросмещения:

$$y'' = -A\omega^2 \sin \omega t = -A(2\pi f)^2 \sin 2\pi f t.$$

Амплитуда виброускорения

$$W = A\omega^2 = A(2\pi f)^2.$$

В технической литературе и в инженерной практике величину виброускорения часто выражают в единицах ускорения свободного падения – g ($g = 9,8 \text{ м/с}^2$).

Для перехода от одной единицы измерения величины ускорения к другой можно воспользоваться формулой

$$j = \frac{W}{g} \approx 4Af^2.$$

Задача

Конструктивный элемент РЭС колеблется с амплитудой 0,1 мм на частоте 50 Гц. Определить величину воздействующего на него ускорения.

Решение

$$j \approx 4Af^2 = 4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} (50)^2 = 1g.$$

Периодические вибрации в виде искаженной синусоиды или другой сложной формы наиболее часто встречаются на реальных подвижных объектах, где могут эксплуатироваться РЭС. Подобные периодические процессы при анализе представляют в виде ряда Фурье:

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \cos n\omega t + c_n \sin n\omega t),$$

где a_0, b_n, c_n – коэффициенты ряда Фурье;

n – номер гармонической составляющей.

Амплитуда любой гармоники с номером n определяется из выражения

$$A_n = \sqrt{b_n^2 + c_n^2}.$$

Графическая интерпретация преобразования Фурье представлена на рис. 6.4.

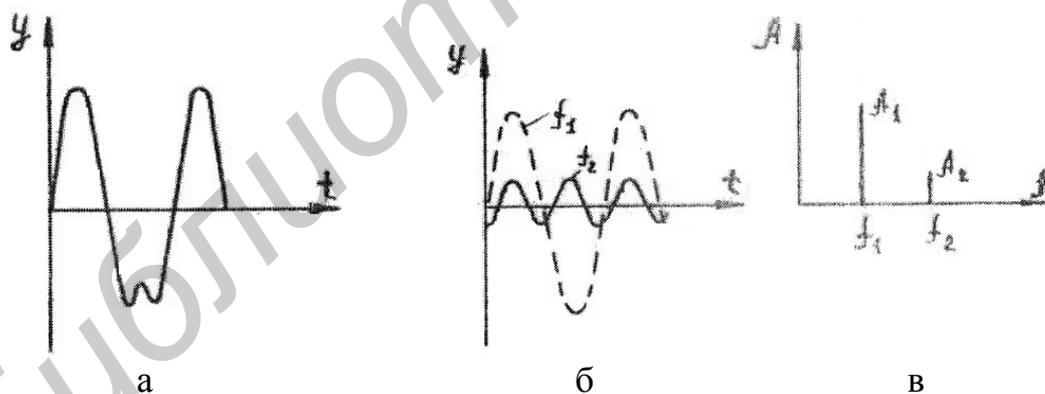


Рис. 6.4. Представление периодического процесса сложной формы:
а, б – во временной области; в – в частотной области

Некоторые современные вычислительные комплексы в библиотеке стандартных программ имеют программу, с помощью которой можно осуществить преобразование периодического процесса сложной формы в ряд Фурье.

Исходные данные для расчета на ЭВМ по такой программе (T, h_i, A_i) представлены на рис. 6.5.

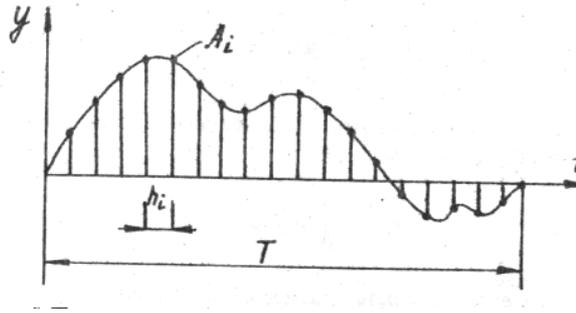


Рис. 6.5. Подготовка данных для анализа сложного периодического процесса на ЭВМ

Если внешнее воздействие синусоидально, а рассматриваемая линейная система устойчива, то по истечении некоторого промежутка времени свободные колебания системы затухают и остаются только вынужденные колебания, параметры которых вычислить несложно. Однако, если внешняя сила является случайной, то свободные колебания постоянно возобновляются и движение системы является сложной смесью свободных и вынужденных колебаний. Именно такие колебания блоков и элементов РЭС имеют место на подвижных объектах, двигательные установки которых или условия движения создают случайные механические воздействия на борту.

Случайная вибрация в отличие от детерминированной не может быть описана точными математическими соотношениями. Для ее характеристики можно использовать математическое ожидание и дисперсию случайной величины. Однако вибрационные процессы могут иметь одинаковые математическое ожидание и дисперсию, но различный характер изменения по оси времени (различная растянутость вдоль временной оси). Поэтому целесообразнее случайную вибрацию характеризовать с помощью метода частотного анализа, а не временного. Для этой цели используются такие характеристики, как спектральная плотность мощности колебательного процесса и корреляционная функция, которые взаимосвязаны между собой соотношением Хинчина–Винера.

Для стационарных случайных функций, математические ожидания которых сохраняют одно и то же постоянное значение при всех значениях аргумента t и корреляционные функции которых зависят только от разности аргументов $t_2 - t_1 = \tau$, спектральная функция

$$S(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} k(\tau) \cos \omega \tau d\tau.$$

Корреляционная функция

$$k(\tau) = \int_0^{\infty} S(\omega) \cos \omega \tau d\omega.$$

Функцию частоты $S(\omega)$ называют спектральной плотностью мощности случайной функции $x(t)$, так как при $\tau = 0$

$$k(0) = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega.$$

Поскольку $k(0)$ есть мощность стационарной случайной функции $x(t)$, то $S(\omega)$ отражает распределение этой мощности по частотам (рис. 6.6).

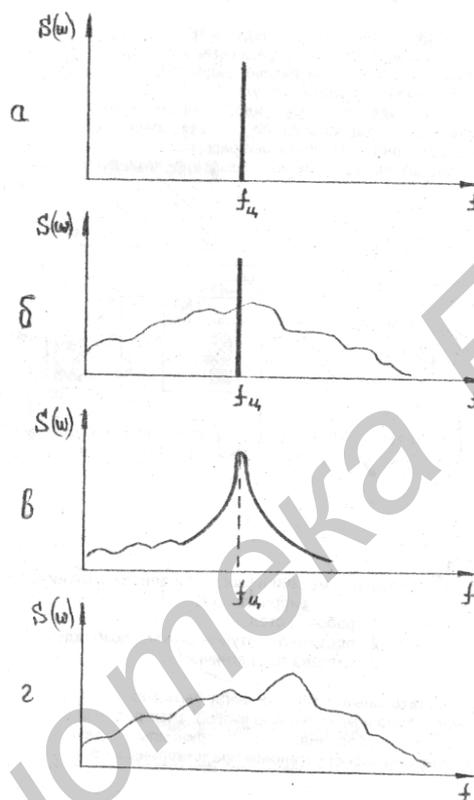


Рис. 6.6. Спектральные плотности:

- а – гармонический процесс;
- б – гармонический процесс плюс случайный;
- в – узкополосный случайный процесс;
- г – широкополосный случайный процесс

6.2.2. Воспроизведение механических воздействий на испытательных стендах

Соответствующими стандартами предусмотрены различные виды испытаний РЭС на механические воздействия. Определены и степени жесткости испытаний, количество которых различно для разных видов. Так, например, для вибраций установлено 14 степеней жесткости, для ударов – 4 и т.д.

Для воспроизведения вибраций используются механические, электродинамические, гидравлические, пьезоэлектрические и другие разновидности

вибростендов. Наибольшее распространение при испытаниях РЭС получили электродинамические и механические вибростенды (рис. 6.7).

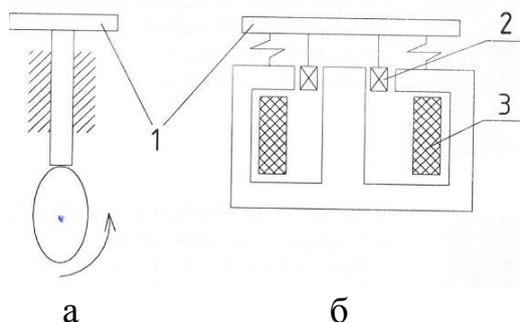


Рис. 6.7. Конструкции механического (а) и электродинамического (б) вибростендов:

- 1 – рабочий стол; 2 – подвижная катушка сигнала возбуждения;
3 – катушка подмагничивания

Ударные испытательные установки могут быть механические (со свободным падением рабочего стола и маятниковые копры), электродинамические и др.

Конструктивное исполнение и принципы действия наиболее употребительных механических установок представлены на рис. 6.8.

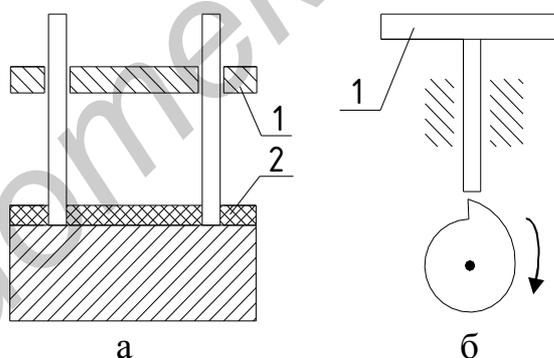


Рис. 6.8. Ударные испытательные установки:

- а – со свободным падением рабочего стола; б – кулачкового типа
для воспроизведения многократных ударных процессов;
1 – рабочие столы вибростендов; 2 – прокладка

Линейные нагрузки воспроизводят на центрифугах (вращающихся дисках), создающих в горизонтальной плоскости радиально-направленные ускорения (рис. 6.9).

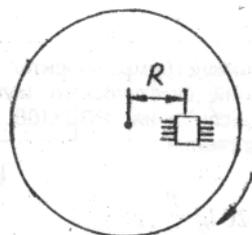


Рис. 6.9. Диск центрифуги

Величина возникающего ускорения на расстоянии R от центра вращающегося диска определяется выражением

$$W = \frac{V^2}{R},$$

где V – линейная скорость движения объекта испытаний по окружности.

Акустические шумы воспроизводят в специально оборудованных помещениях либо в реверберационных камерах (рис. 6.10).

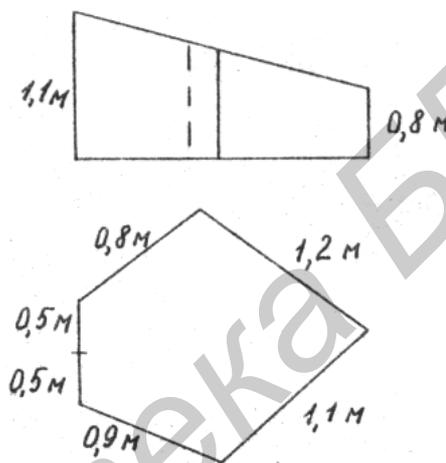


Рис. 6.10. Реверберационная камера

Отсутствие параллельных стенок в подобных камерах позволяет получить в объеме равномерное акустическое поле (исключается появление стоячих волн).

Источниками акустического шума в испытательных установках могут служить:

- динамические сирены;
- статические сирены;
- мощные электродинамические громкоговорители.

Уровни звуковых давлений акустического шума или тона меняющейся частоты могут достигать при испытаниях РЭС 160...170 дБ. Уровень звукового давления определяется из выражения

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0}, \text{ дБ},$$

где P – звуковое давление шума или тона, Па;

$P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па – звуковое давление порога слышимости.

При производстве РЭС возможны следующие виды испытаний:
обнаружение резонансных частот;

виброустойчивость;
 вибропрочность;
 ударная прочность;
 воздействие одиночных ударов;
 воздействие линейных (центробежных) нагрузок;
 воздействие акустических шумов.

Испытаниям на обнаружение резонансных частот подвергаются новые разработки конструкций РЭС. Дальнейшие испытания РЭС определяются условиями эксплуатации, и на воздействие наиболее типичных видов нагрузок аппаратура должна быть испытана. Определяющим условием, позволяющим выбрать наиболее рациональный метод испытаний, является информация о значениях резонансных частот изделий, полученных расчетным или экспериментальным путем. Например, если собственная частота печатной платы превышает верхнюю частоту диапазона воздействующих вибраций более чем в 1,5 раза, то применяется метод испытаний на одной фиксированной частоте. Если резонансные частоты не установлены, то применяется метод качающейся частоты. Если объект имеет не менее четырех собственных частот в заданном диапазоне, используется метод случайной вибрации.

Особенности проведения испытаний на механические воздействия этими замечаниями не ограничиваются. Заинтересованному читателю следует обратиться к литературным источникам по вопросам испытаний РЭС и испытательного оборудования.

Типичная структурная схема измерительного тракта для определения параметров механических воздействий представлена на рис. 6.11.

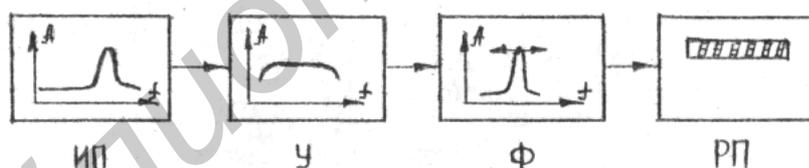


РИС. 6.11. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА:

ИП – измерительный преобразователь; У – согласующий усилитель;
 Ф – фильтр-анализатор; РП – регистрирующий прибор

В качестве измерительных преобразователей чаще всего используются пьезоэлектрические акселерометры (для измерения параметров вибраций, ударов и линейных нагрузок) и конденсаторные микрофоны (для измерений параметров акустических шумов). Схематично конструкция пьезоэлектрического акселерометра представлена на рис. 6.12.

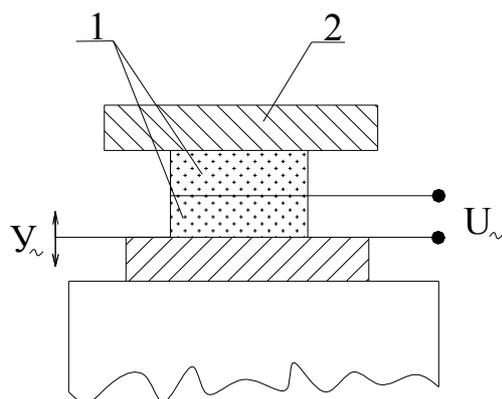


Рис. 6.12. Пьезоэлектрический акселерометр

1 – ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТЫ; 2 – ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ МАССА

При воздействии на датчик вибрации y_{\sim} реакция дополнительной массы 2 на пьезоэлементы 1 будет приводить к их деформации и появлению на выходе датчика переменного электрического напряжения U_{\sim} .

Одна из известных фирм по выпуску элементов подобных измерительных трактов – фирма «Брюль и Кьер» (Дания).

6.2.3. Динамические характеристики конструкций РЭС

Для возможности проведения расчетов конструкции аппаратуры и ее элементы необходимо предельно упростить – представить в виде физических моделей (рис. 6.13).

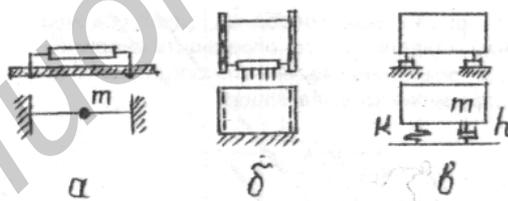


Рис. 6.13. Резистор (а), печатная плата (б), блок аппаратуры (в) и их модели

Для более детального анализа процессов, протекающих в аппаратуре и ее составных элементах при воздействии вибрации, используют более сложные модели. Пример такой сложной модели радиоэлектронного аппарата представлен на рис. 6.14, а.

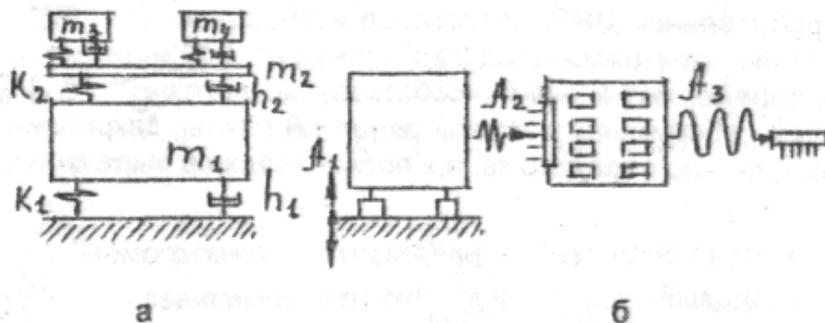


РИС. 6.14. СЛОЖНАЯ МОДЕЛЬ АППАРАТА (А) И ДИНАМИКА ПЕРЕДАЧИ ВИБРАЦИЙ ОТ МЕСТА ЗАКРЕПЛЕНИЯ АППАРАТА К ЭЛЕМЕНТАМ, ЗАКРЕПЛЕННЫМ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ (Б)

Иногда для анализа механических процессов используют математические (метод конечных разностей, метод конечных элементов и др.), аналоговые и электромеханические модели.

При передаче вибраций по конструкции аппаратуры их амплитуда может и ослабляться и усиливаться (рис. 6.14, б).

Для анализа вибрационных процессов необходимо уметь оценивать основные динамические характеристики аппаратуры и ее элементов.

К основным динамическим характеристикам аппаратуры и ее элементов относят значения собственных (резонансных) частот, собственные формы колебаний, значения коэффициентов динамичности и коэффициентов демпфирования.

Значения собственных частот конструктивных элементов аппаратуры (элементов рамных конструкций, пластин и т.д.) определяются по формулам, известным из курса классической механики.

Значения частот собственных колебаний электрорадиоэлементов (ЭРЭ), приводимых к балочным моделям, можно определить аналитически или по номограммам. Например, для резистора, модель которого представлена на рис. 6.13, а резонансная частота определяется выражением

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{192EJ}{ml^3}},$$

где E – модуль упругости материала выводов;

$$J = \frac{\pi d^4}{64} - \text{момент инерции сечения вывода резистора (d – диаметр вывода}$$

резистора);

m – масса резистора;

l – длина резистора.

Подобные расчеты удобнее производить по номограммам, разработанным для наиболее употребительных ЭРЭ (резисторов и конденсаторов).

Вид одной из таких номограмм представлен на рис. 6.15. Зная тип резистора и длину его выводов, определяют значение собственной частоты.

Значение первой собственной частоты печатной платы, закрепленной по углам в четырех точках, можно определить, воспользовавшись выражением

$$f_0 = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{m''}},$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\gamma^2)}$ – цилиндрическая жесткость платы;

$m'' = \frac{m}{ab}$ – распределенная по площади масса платы и элементов, разме-

щенных на плате;

E – модуль упругости материала платы;

h – толщина платы;

m – масса платы с элементами (МС, ЭРЭ и т.д.);

a – длина платы;

b – ширина платы;

γ – коэффициент Пуассона для материала платы.

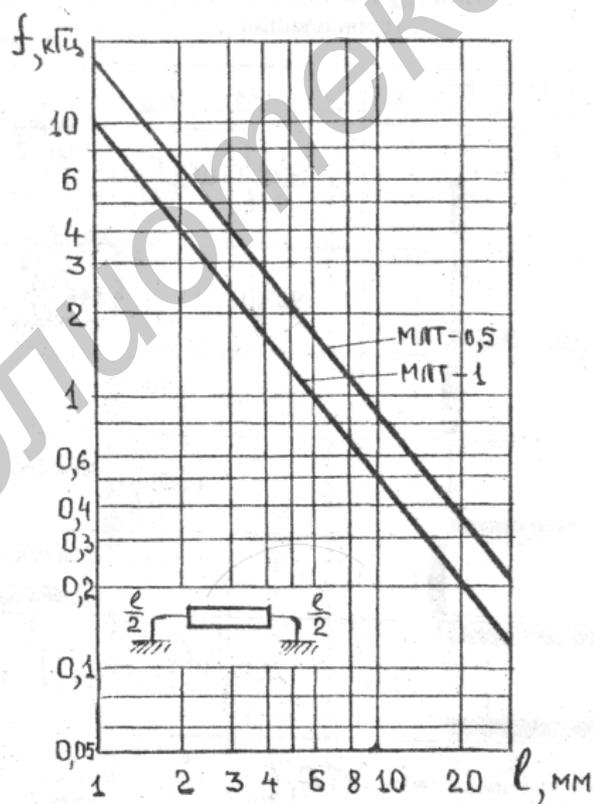


Рис. 6.15. Номограмма для определения значения f_0 резисторов типа МЛТ в зависимости от суммарной длины выводов

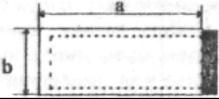
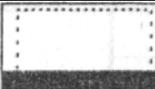
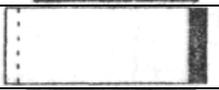
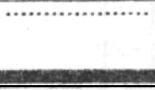
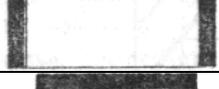
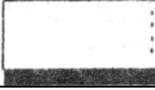
Более общее выражение для расчета значения собственных частот пластин имеет вид

$$f_0 = \frac{K_a}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{D}{m''}},$$

где K_a – коэффициент, зависящий от способа закрепления пластины (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Значения коэффициента K_a для различных способов закрепления сторон пластин

Вариант закрепления сторон пластины	K_a
	$15,42 \sqrt{1 + 0,95\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0,41\left(\frac{a}{b}\right)^4}$
	$9,87 \sqrt{1 + 2,33\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 2,44\left(\frac{a}{b}\right)^4}$
	15,42
	$15,42\left(\frac{a}{b}\right)^2$
	22,37
	$22,37 \sqrt{0,1\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 0,41\left(\frac{a}{b}\right)^4}$

Примечание. Обозначения штриховок: – жесткое закрепление стороны пластины; – сторона лежит на опоре; – сторона пластины свободна.

В практике проектирования печатных плат РЭС иногда пользуются формулой несколько иного вида:

$$f_0 = k_m k_b B h \frac{10^4}{a^2},$$

где k_m – коэффициент, зависящий от материала платы (для гетинакса – 0,5, для стеклотекстолита – 0,52);

$k_b = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_{\text{э}}}{m_n}}}$ – коэффициент, зависящий от массы элементов $m_{\text{э}}$, размещенных на

поверхности платы, масса которой m_n ;

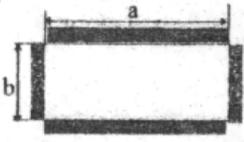
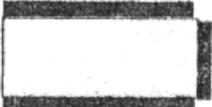
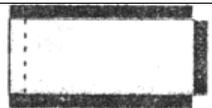
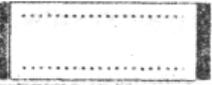
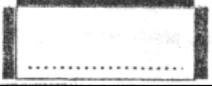
B – коэффициент, зависящий от соотношения длины сторон и способа закрепления платы, табл. 6.2;

h – толщина платы, см;

a – длина платы, см.

Таблица 6.2

Значения коэффициента B

Варианты закрепления сторон платы	a/b							
	0,25	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
	-	-	86	145	234	352	497	868
	40	41	56	84	124	176	240	864
	10	19	58	124	217	336	479	855
	33	44	76	139	230	349	494	866
	54	56	69	93	131	181	244	406
	54	58	76	115	175	254	353	607

Для блока, установленного на виброизоляторах, значение f_0 определяется из выражения

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}},$$

где K_{Σ} – суммарная жесткость используемых виброизоляторов;

m – масса блока.

Задача

Блок РЭС массой 10 кг установлен на четырех равнонагруженных виброизоляторах, жесткость каждого из которых при осевом нагружении составляет 4 Н/мм. Определить значение частоты собственных колебаний блока в вертикальном направлении.

Решение

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}} = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{4*4*10^3}{10}} \approx 6,4 \text{ Гц.}$$

Собственные формы колебаний представляют собой виброрельефы колебаний конструктивных элементов типа балок и плат на соответствующих резонансных частотах (рис. 6.16).

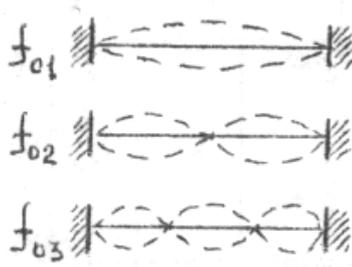


РИС.6.16. КОНСТРУКТИВНЫЙ ЭЛЕМЕНТ В ВИДЕ БАЛКИ И ЕГО ТРИ ПЕРВЫЕ СОБСТВЕННЫЕ ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ

Важной динамической характеристикой плат и других конструктивных элементов аппаратуры является коэффициент динамичности, который представляет собой отношение амплитуды колебаний блока или центра печатной платы к амплитуде колебаний основания или точек закрепления платы:

$$\mu = \frac{A}{A_0}.$$

Вид зависимости значения μ конструктивного элемента от частоты возмущающей вибрации f представлен на рис. 6.17.

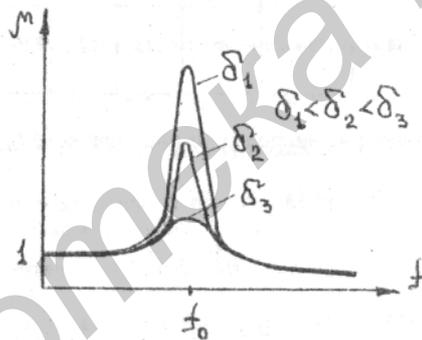


Рис. 6.17. Зависимость значения μ от частоты вибрации

Из приведенных кривых видно, что μ может принимать значение как больше, так и меньше единицы, т.е. конструктивный элемент или блок аппаратуры в зависимости от частоты возмущающей силы может как усиливать, так и ослаблять вибрацию.

График изменения μ в зависимости от частоты называют амплитудно-частотной характеристикой конструктивного элемента. Эта кривая в дальнейшем будет использована для обоснования и оценки эффективности различных способов виброзащиты.

Коэффициент динамичности для любого значения текущей частоты f может быть определен по формуле

$$\mu = \frac{A}{A_0} = \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 a^2}{(1 - a^2)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 a^2}},$$

где δ – логарифмический декремент затухания колебаний;

$a = \frac{f}{f_0}$ – коэффициент расстройки по частоте.

f_0 – значение собственной частоты.

Задача

Определить амплитуду колебаний центра печатной платы на частоте $f = 100$ Гц, если амплитуда точек закрепления платы $A_0 = 1$ мм, значение ее собственной частоты $f_0 = 200$ Гц, а значение логарифмического декремента затухания колебаний платы $\delta = 0,1$.

Решение

1. Определяем значение коэффициента расстройки по частоте:

$$a = \frac{f}{f_0} = \frac{100}{200} = 0,5.$$

2.

$$A = A_0 * \mu = A_0 \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 a^2}{(1 - a^2)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 a^2}} \approx 1$$

Из полученного результата следует, что при таком соотношении частот ($f = 100$ Гц и $f_0 = 200$ Гц) плата практически не усиливает воздействующую вибрацию ($\mu \approx 1$).

При проведении расчетов динамических характеристик конструкций, особенно в области резонансной частоты, необходимо учитывать их поглощающие свойства при колебаниях. Влияние этих свойств на значение коэффициента динамичности в диапазоне частот наглядно видно из рис. 6.17.

Наиболее часто в инженерной практике для оценки поглощающих свойств конструктивных элементов используется логарифмический декремент затухания колебаний. Его значение достаточно просто может быть определено экспериментально даже для конструктивного элемента, состоящего из комбинации разнородных материалов, например многослойной печатной платы.

Если имеется запись свободных затухающих колебаний механической системы (рис. 6.18), то значение логарифмического декремента затухания колебаний определяется из выражения

$$\delta = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}}.$$

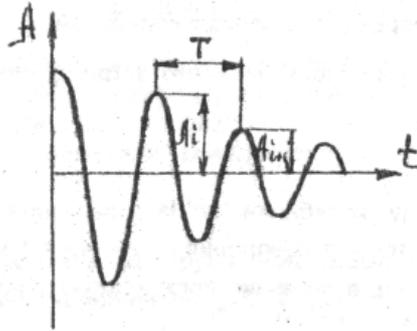


Рис. 6.18. Запись свободных затухающих колебаний

При учете нескольких периодов колебаний T , например n :

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_i}{A_{i+n}}.$$

Если имеется амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) механической системы в области собственной частоты f_0 (рис. 6.19), то

$$\delta = \pi \frac{\Delta f}{f_0},$$

где Δf – ширина полосы частот на уровне 0,707 от максимального значения амплитуды.

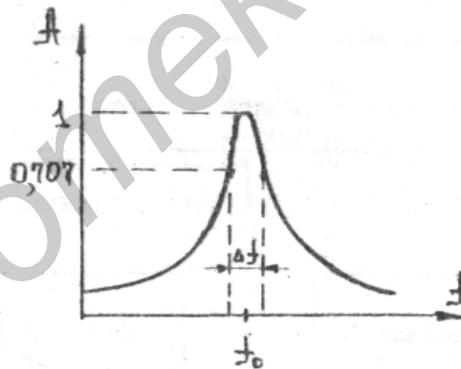


Рис. 6.19. Амплитудно-частотная характеристика

Задача

Определить значение логарифмического декремента затуханий для печатной платы, собственная частота которой $f_0 = 200$ Гц, а ширина полосы частот на уровне 0,707 составляет 20 Гц.

Решение

$$\delta = \pi \frac{\Delta f}{f_0} = 3,14 \frac{20}{200} = 0,314.$$

6.2.4. Реакция конструкций РЭС на механические воздействия

При воздействии на радиоэлектронную аппаратуру вибраций, ударов, линейных нагрузок и акустических шумов возможно возникновение нарушений ее функционирования, которые можно классифицировать следующим образом (рис. 6.20).

Восстанавливаемые отказы функционирования аппаратуры, к которым относят искажение или появление в полезном сигнале большого уровня шумов и паразитную модуляцию полезного сигнала, возникают из-за тензорезистивных эффектов, пьезоэлектрических и электромагнитных явлений в элементах РЭС, обладающих способностью к проявлению подобных эффектов при знакопеременных деформационных нагрузках.

К подобным элементам аппаратуры можно отнести тонкопленочные резисторы на подложках микросхем, сегнетокерамические конденсаторы, полупроводниковые приборы и даже обычные проводники, колеблющиеся в магнитных полях.

Невосстанавливаемые отказы, к которым приводят различного рода обрывы и поломки, окончательно выводят аппаратуру из строя, и ее функционирование не возобновляется после прекращения воздействия вибрации. Примерами такого рода отказов могут быть, например, разрывы дорожек печатного монтажа вибрирующей платы, разрушение паяных, сварных и клеевых соединений, обрывы выводов резисторов, конденсаторов и т.д.

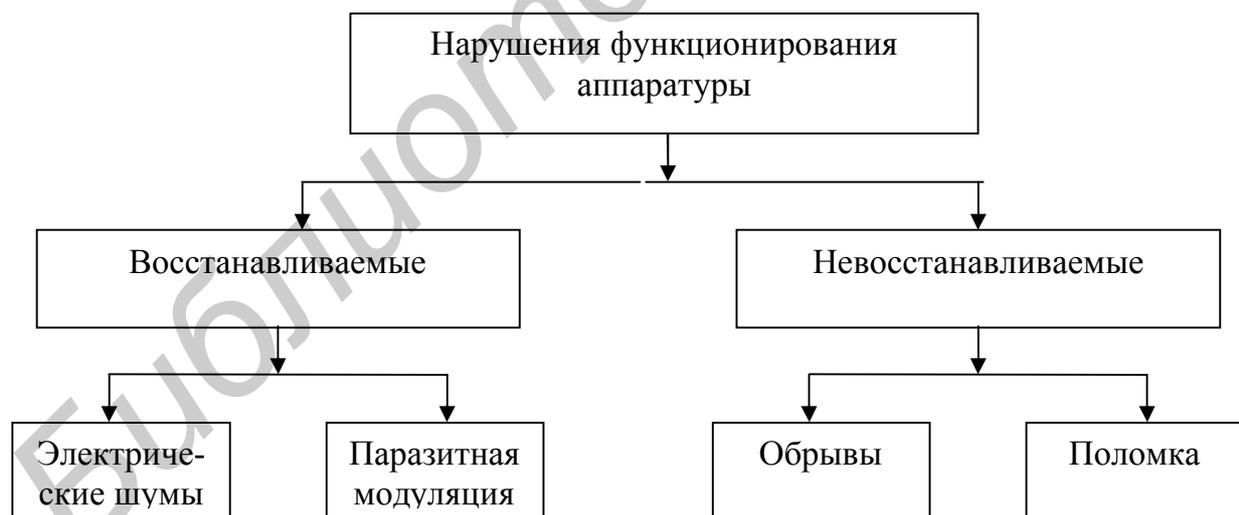


Рис. 6.20. Классификация нарушений функционирования аппаратуры

Разновидности механических процессов, возникающих в элементах конструкций радиоэлектронной аппаратуры при воздействии вибрации, представлены на рис. 6.21.

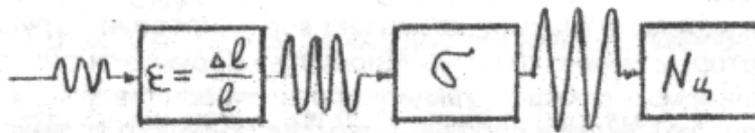


РИС. 6.21. ВОЗМОЖНЫЕ ВИДЫ РЕАКЦИИ КОНСТРУКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА АППАРАТУРЫ НА ВИБРАЦИЮ

При воздействии на конструктивный элемент аппаратуры вибрации малого уровня возникает его динамическая упругая деформация ε , которую можно оценить отношением величины удлинения или укорочения элемента Δl к его исходной длине l .

При увеличении уровня вибрационной нагрузки возможно появление в конструктивном элементе из металла пластических деформаций, которые приводят к возникновению остаточных механических напряжений σ .

При больших уровнях вибрационной нагрузки возможно разрушение конструктивного элемента после некоторого количества циклов (N_u) изменения нагрузки, обусловленной вибрацией. Определение количества циклов изменения нагрузки до разрушения N_u производится для металлов по линиям Веллера.

В общем виде линии Веллера, или кривые усталости металлов, представляют собой графические зависимости числа циклов изменения нагрузки до разрушения (N_u) от величины переменного механического напряжения σ (рис. 6.22).

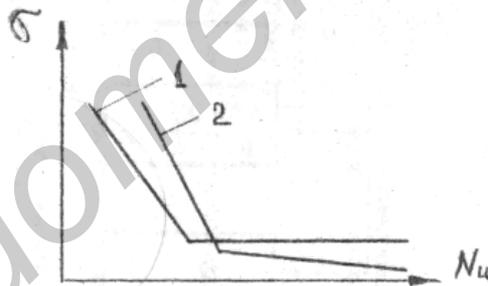


РИС. 6.22. ЛИНИИ ВЕЛЛЕРА ДЛЯ СТАЛИ (1) И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ (2)

Ход линии Веллера для стали параллельно оси N_u для малых значений механических напряжений физически означает то, что в таком случае конструктивный элемент практически выдержит бесконечное число циклов изменения нагрузки ($N_u = \infty$).

Кроме механической ветви реакции элементов РЭС на механические воздействия существует и электрическая ветвь, обусловленная механическими процессами – деформацией и механическими напряжениями (рис. 6.23).

Эта ветвь реакции определяет устойчивость РЭС к механическим воздействиям и должна учитываться при проектировании чувствительной аппаратуры, с помощью которой осуществляется преобразование сигналов малого уровня.

Под устойчивостью аппаратуры понимают ее нормальное функционирование при механических воздействиях. Если РЭС не обладает достаточной устой-

чивостью, то в ее выходном сигнале могут появиться составляющие, не предусмотренные функциональным назначением. Возможно появление и шумового напряжения достаточно высокого уровня. Наиболее типичными причинами нарушения устойчивости работы РЭС при механических воздействиях являются следующие:

1. Изменение значения переходного сопротивления в контактных группах разъемов, реле, герконов и т.д.
2. Изменение параметров пассивных элементов РЭС (тонкопленочных резисторов, катушек индуктивности, некоторых типов конденсаторов).
3. Изменение параметров активных элементов РЭС – ИМС и ПП.
4. Появление шумовых напряжений в проводниках, колеблющихся в магнитных полях.
5. Появление шумовых напряжений в кабелях за счет возникающих электрических зарядов на деформируемых при механических воздействиях высококачественных диэлектриках.

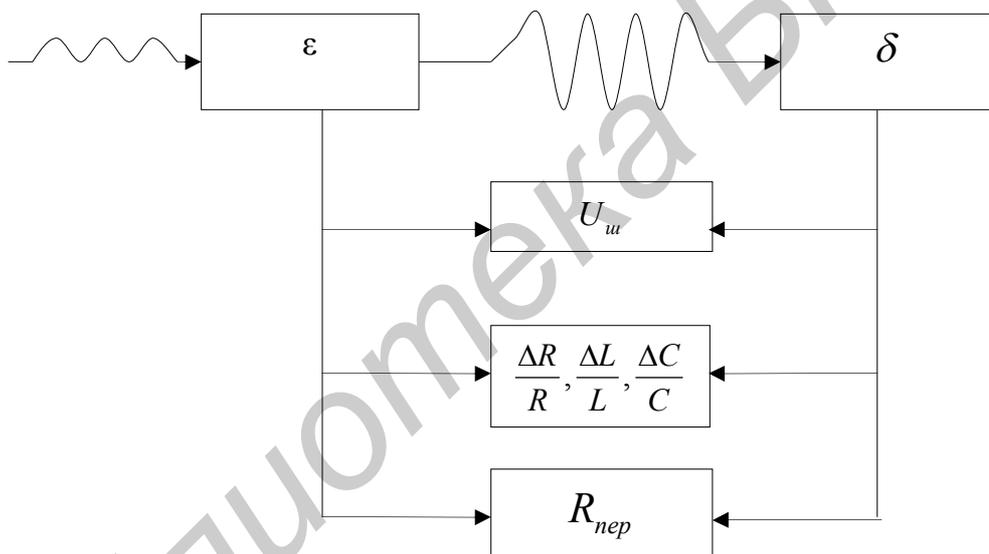


Рис. 6.23. Реакция активных и пассивных элементов РЭС на механические воздействия:

$U_{ш}$ – появление напряжения шумов; $\frac{\Delta R}{R}, \frac{\Delta L}{L}, \frac{\Delta C}{C}$ – изменение параметров пассивных элементов РЭС; $R_{пер}$ – нестабильность переходных сопротивлений

Основные виды откликов элементов РЭС на механические воздействия и возможные защитные мероприятия представлены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Основные виды реакции элементов РЭС на механические воздействия

Элементы РЭС	Возможный механический отклик	Возможный электрический отклик	Защитные мероприятия
Резисторы и конденсаторы: а) дискретные б) пленочные в) переменные	Разрушение мест пайки, обрывы выводов Трещины в пленке Поворот оси ротора и смещение пластин КПЕ Поворот оси резистора	Разрыв электрической цепи, тензоэффект Изменение значения емкости Изменение значения сопротивления	Исключение резонансных колебаний. Размещение элементов на участках подложек с минимальной деформацией. Стопорение оси контргайками, гровершайбами, нитроклеем или лаком
ПП, ИМС	Обрывы выводов, разрушение мест пайки. Деформация и растрескивание подложек ИМС	Пьезоэффект, тензоэффект	Дополнительное крепление компаундом. Размещение элементов на участках плат с минимальной деформацией
Реле, разъёмы, переключатели, герконы	Взаимное перемещение контактных элементов	Переменное значение переходного сопротивления	Определенная ориентация контактных групп относительно вектора воздействующих вибраций
Провода и кабели	Перемещения в пространстве, деформация и обрывы, особенно в местах пайки	Виброшумы за счет электромагнитной индукции и кабельного эффекта	Вязка в жгуты, дополнительные точки крепления, использование антивибрационного кабеля, например, типа АВК-6

6.2.5. Защита конструкций РЭС от вибраций

ПРОЧНОСТЬ к воздействию механических факторов – это способность изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах норм, установленных в стандартах, после воздействия механических факторов.

УСТОЙЧИВОСТЬ к воздействию механических факторов – это способность изделий выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах норм, установленных в стандартах, во время воздействия механических факторов.

К изделиям, предназначенным для функционирования в условиях воздействия механических нагрузок, предъявляют требования по прочности и устойчивости. К изделиям, не предназначенным для функционирования в условиях

воздействия механических нагрузок, предъявляют требования только по прочности.

Как следует из приведенных выше определений для прочности и устойчивости, обеспечение устойчивости является более сложной технической задачей, чем обеспечение прочности.

Способы защиты конструкций РЭС от вибраций удобно классифицировать и наглядно представить, если использовать зависимость коэффициента динамичности μ от частоты f . С использованием этой зависимости способы виброзащиты можно подразделить на три разновидности (рис. 6.24).

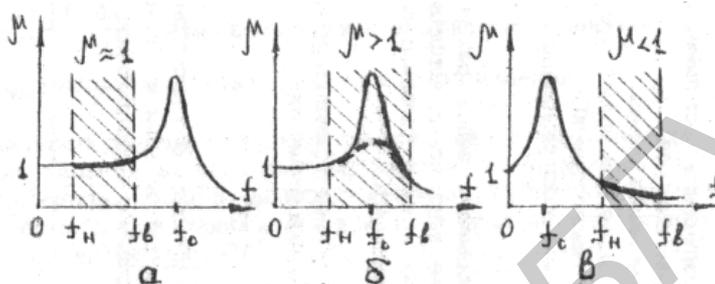


РИС.6.24. СПОСОБЫ ВИБРОЗАЩИТЫ:

- а – увеличение жесткости конструктивных элементов (увеличение f_0);
- б – использование конструктивных элементов с увеличенной степенью демпфирования; в – использование виброизоляторов

На рис. 6.24 представлено соотношение собственной резонансной частоты защищаемого конструктивного элемента f_0 относительно диапазона частот воздействующих вибраций от f_n до f_b . Как следует из приведенного рисунка, вывод резонансной частоты f_0 элемента за пределы диапазона частот воздействующих вибраций в более высокочастотную область позволяет в диапазоне частот воздействующих вибраций обеспечить значение коэффициента динамичности $\mu \approx 1$. Это означает, что резонансного возбуждения колебаний защищаемого элемента происходить не будет. Подобное смещение значения f_0 в более высокочастотную область можно обеспечить увеличением жесткости конструктивных элементов.

Примеры конструктивного исполнения элементов аппаратуры, обладающих повышенной жесткостью, представлены на рис. 6.25.

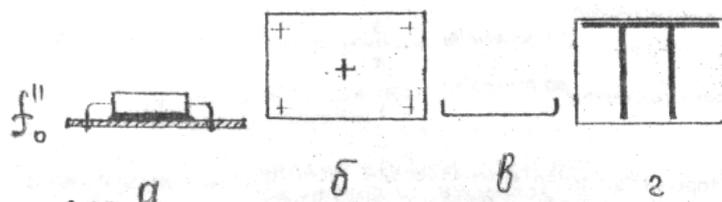


Рис. 6.25. Конструктивные решения, позволяющие увеличить жесткость:
 а – применение дополнительных точек или площадок крепления с помощью клея; б – применение дополнительных точек крепления;
 в – применение отбортовок и профилирования (для пластин из металла);
 г – применение ребер жесткости

На рис. 6.24, б показано изменение хода зависимости μ от f при использовании конструктивных элементов, обладающих повышенной степенью демпфирования (пунктирная кривая). Большую степень демпфирования колебаний можно обеспечить, например, используя платы с вибропоглощающим покрытием, слоистые конструкции либо используя заливку поверхности платы с элементами демпфирующими материалами.

На рис. 6.26 представлены подобные конструктивные решения.

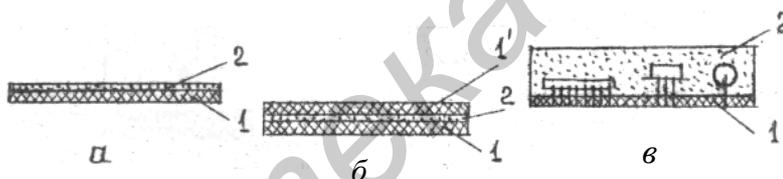


РИС. 6.26. ДЕМПФИРОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИИ:

а – с вибропоглощающим покрытием 2; б – с вибропоглощающим слоем 2;
 в – с вибропоглощающим заливочным материалом 2

Применение демпфирующих покрытий и слоистых конструкций позволяет снизить значения коэффициентов динамичности таких конструктивных элементов, как печатные платы с нескольких десятков до нескольких единиц, причем в области их резонансных колебаний.

К недостаткам этого способа виброзащиты следует отнести ухудшение ремонтоспособности РЭС, зависимость характеристик покрытий и заливок от температуры, возникновение больших внутренних напряжений в компаунде при его полимеризации, изменение свойств покрытий и заливок с течением времени. Кроме того, величина рассеяния энергии механических колебаний полимерными материалами зависит от частоты, амплитуды и формы колебаний, состава компонентов, вида напряженного состояния. Эти обстоятельства усложняют аналитическую оценку эффективности виброзащиты, и в данном случае рациональнее использовать экспериментальные методы определения коэффициента механических потерь η через логарифмический декремент затухания колебаний

$$\eta = \frac{\delta}{\pi}$$

или через механическую добротность

$$\eta = \frac{1}{Q}.$$

Некоторые экспериментальные методы определения логарифмического декремента затухания колебаний конструкции изложены в п. 6.2.3 данного пособия.

Наиболее эффективным способом виброзащиты является виброизоляция, так как только в этом случае удастся получить значения коэффициента динамичности $\mu < 1$ в диапазоне частот воздействующих вибраций (см. рис. 6.24). Подобный способ виброзащиты может быть использован как для блоков, так и для отдельных чувствительных к вибрациям элементов аппаратуры. Виброизоляция обеспечивается тем, что между защищаемым аппаратом или его элементом и вибрирующей поверхностью устанавливаются специальные элементы - виброизоляторы. Некоторые схемы монтажа блоков на виброизоляторах представлены на рис. 6.27.

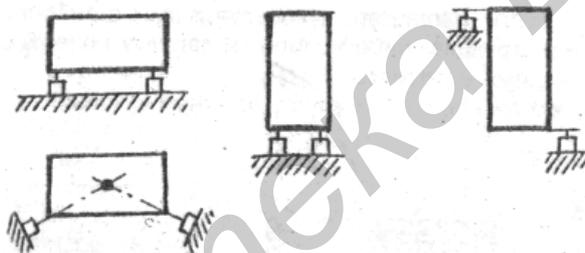


Рис. 6.27. Схемы монтажа блоков аппаратуры на виброизоляторах

Установка блоков на виброизоляторах обеспечивает значение их собственных частот $f_0 \approx 10...25$ Гц. В этом случае, начиная с частот 30–40 Гц, обеспечивается эффективная защита блока от вибраций ($\mu < 1$) и чем выше частота воздействующей вибрации, тем эффективнее виброзащита.

Используемые в настоящее время виброизоляторы можно подразделить на 4 основные разновидности:

- 1) резинометаллические;
- 2) пружинные с воздушным демпфированием;
- 3) пружинные с фрикционным демпфированием;
- 4) цельнометаллические.

В качестве примера конструктивного исполнения виброизолятора на рис. 6.28 показан вид пружинного виброизолятора с воздушным демпфированием. Демпфирование колебаний в данной конструкции обеспечивается движением воздуха через небольшое отверстие в резиновом баллончике 2.

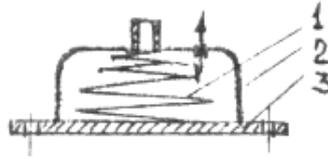


РИС. 6.28. ВИБРОИЗОЛЯТОР ПРУЖИННЫЙ С ВОЗДУШНЫМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ:

1 – пружина; 2 – резиновый баллончик с отверстием;
3 – элемент крепления

Оценку эффективности виброизоляции в первом приближении можно осуществить следующим образом:

1. Определяют значение собственной резонансной частоты блока на виброизоляторах:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}},$$

где K_{Σ} – суммарная жесткость системы виброизоляции;

m – масса блока.

2. Определяют значения амплитуды вынужденных колебаний блока либо значения коэффициента динамичности блока на виброизоляторах в диапазоне частот воздействующих вибраций:

$$A = \frac{A_0}{\left| 1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right|} \quad \text{или} \quad \mu = \frac{1}{\left| 1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right|},$$

где A_0 – амплитуда колебаний основания в месте монтажа блока;

f – текущее значение частоты вибрации;

f_0 – собственная резонансная частота блока на виброизоляторах.

3. По известным значениям амплитуды колебаний блока и частоты вибрации определяют значение возникающего ускорения и сравнивают его с допустимым:

$$j = 4Af^2 \leq j_{\text{дон}}.$$

Оценку эффективности виброизоляции по такой методике можно осуществить с помощью ЭВМ. Блок-схема алгоритма подобного расчета приведена на рис. 6.29. Она позволяет из совокупности виброизоляторов, данные о которых введены в память ЭВМ, выбрать те, которые обеспечивают необходимую степень виброизоляции по величине амплитуды колебаний блока. В данной блок-схеме может быть использован и другой критерий оценки эффективности виброизоляции – виброускорение.

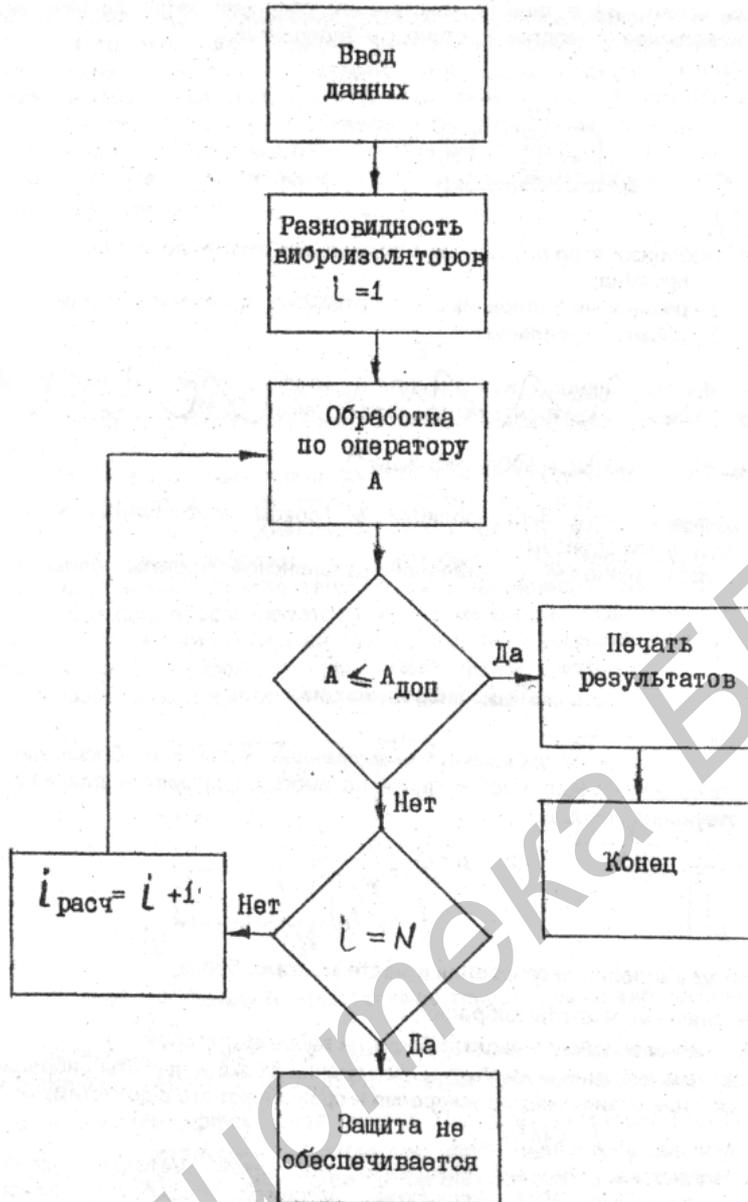


Рис. 6.29. Блок-схема алгоритма выбора виброизоляторов с помощью ЭВМ

6.2.6. Защита РЭС от ударов, линейных нагрузок и акустических шумов

Реакция элементов и блоков РЭС на ударные нагрузки определяется не только величиной амплитуды ускорения воздействующего ударного импульса, но и соотношением длительности ударного импульса и периода собственных колебаний объекта (рис. 6.30). Большая величина отклика будет наблюдаться у конструктивных элементов, полупериод собственных колебаний которых сравним или меньше длительности ударного импульса. Другими словами, чем короче ударный процесс (меньше τ_u), тем меньшее число конструктивных элементов РЭС в максимальной степени будет реагировать на такое воздействие.

Этот вывод позволяет рекомендовать к использованию системы виброизоляции для защиты блоков РЭС и от ударных нагрузок, так как установка блоков на виброизоляторы приводит к увеличению значения T (значение f_0 блока на виброизоляторах мало). При проектировании подобных систем виброизоляции следует иметь в виду то обстоятельство, что установка блока на слишком «мягкие», низкочастотные виброизоляторы может привести при ударной нагрузке к их деформации до упора и к потере эффективности такой защиты. Поэтому для защиты от ударных нагрузок рекомендуется использовать более жесткие, высокочастотные виброизоляторы, обеспечивающие при номинальной их нагрузке значения собственных частот систем виброизоляции в пределах 25... 30 Гц.

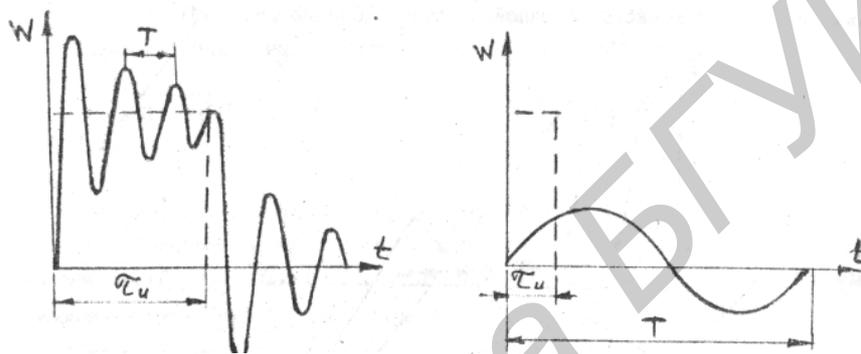


Рис. 6.30. Реакция конструктивного элемента или блока РЭС при различных соотношениях длительности ударного импульса τ_u и периода собственных колебаний объекта T

Оценить эффективность защиты блока на виброизоляторах от ударных нагрузок можно по следующей упрощенной методике, в соответствии с которой последовательно определяются динамические характеристики и параметры блока:

1. Частота собственных колебаний блока:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}},$$

где K_{Σ} – суммарная жесткость виброизоляторов;

m – масса блока.

2. Условная частота воздействующего ударного процесса

$$\omega = \frac{\pi}{\tau},$$

где τ – длительность ударного импульса.

3. Отношение частот

$$\gamma = \frac{\omega}{\omega_0}.$$

4. Коэффициент передачи удара (для полусинусоидального ударного им-

пульса):

$$K_{y\partial} = \frac{2\gamma}{\gamma^2 - 1} \cos \frac{\pi}{2\gamma}.$$

5. Ускорение блока в момент удара:

$$j_{\max} = j_{\text{осн}} \cdot K_{y\partial}.$$

6. Максимальное значение смещения блока при ударе:

$$A_{\max} = \frac{j_{\max}}{\omega_0^2}.$$

Защита от линейных нагрузок, которые характеризуются воздействием на РЭС и ее элементы инерционных сил, изменяющихся с течением времени достаточно медленно, сводится к увеличению прочностных свойств конструктивных элементов и их жесткости. Эти мероприятия, которые можно оценить методами технической механики при воздействии на объекты статических сил, предотвращают разрушение конструкций и недопустимые отклонения их частей от статического положения, что может привести к коротким замыканиям, соприкосновениям элементов и т.д.

Защита РЭС от акустических шумов обеспечивается конструкционным демпфированием (вибропоглощающие покрытия и слоистые конструкции для печатных плат) и использованием звукоизолирующих перегородок.

6.2.7. Защита РЭС при транспортировании

РЭС должны доставляться с завода-изготовителя к потребителю неповрежденными при транспортировании. Во время транспортирования и при проведении погрузочно-разгрузочных работ возможны ударные и вибрационные воздействия. Для защиты от подобных воздействий, климатических факторов, а также для сохранения товарного вида используется упаковка РЭС и их элементов.

Наиболее употребительное конструктивное исполнение упаковки включает достаточно жесткий внешний контейнер из картона или дерева и упаковочные прокладки между стенками контейнера и упаковываемым изделием (рис. 6.31).

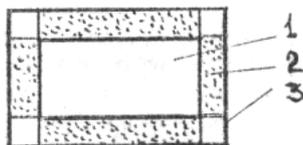


РИС. 6.31. УПАКОВКА РЭС:

1 – упаковываемое изделие; 2 – прокладка; 3 – внешний контейнер

В качестве материала для изготовления упаковочных прокладок используется пенополистирол, гофрированный картон, пенополиуретан, войлок и др.

Основное требование к упаковочным материалам – малая жесткость или, другими словами, возможность относительно легкого деформирования под нагрузкой. Деформирование прокладки при ударе «растягивает» ударный процесс по времени и снижает уровень ударной нагрузки, действующей на упакованный аппарат (рис. 6.32).

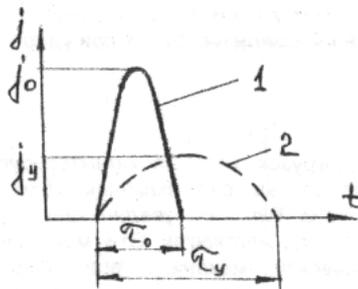


РИС. 6.32. УДАРНЫЕ ИМПУЛЬСЫ:
1 – ДЛЯ АППАРАТА БЕЗ УПАКОВКИ; 2 – ДЛЯ АППАРАТА В УПАКОВКЕ

Потенциальная энергия изделия в упаковке массой m , поднятого на высоту h :

$$W_{\text{пот}} = Gh = mgh.$$

При ударе из-за смятия или деформации упаковки упакованное изделие проходит так называемый путь торможения l . Если считать силу F постоянной, то работа торможения

$$W_{\text{торм}} = F \cdot l.$$

Приравняв эту работу к потенциальной энергии, получим

$$F = \left(\frac{h}{l} \right) mg.$$

Отношение $\frac{h}{l}$ показывает, насколько «увеличивается вес» упаковочной единицы за счет удара. Для снижения уровня динамических нагрузок на изделие это отношение уменьшают за счет увеличения l , т.к. h фиксировано. Конструкция упаковки это и обеспечивает. Если же упругость тары недостаточна, то в упаковке предусматривают дополнительные демпфирующие элементы.

В качестве примера на рис. 6.33 представлен вариант упаковки телевизионного приемника.

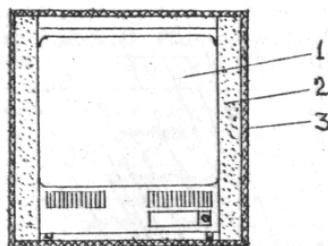


РИС. 6.33. ВАРИАНТ ВЫПОЛНЕНИЯ УПАКОВКИ:
1 – АППАРАТ; 2 – УПАКОВОЧНАЯ ПРОКЛАДКА; 3 – КАРТОННАЯ КОРОБКА

Как видно из рис. 6.33, упаковочные прокладки могут быть не сплошными по всем граням изделия, а, например, состоящими из двух профилированных накладок из пенополистирола, охватывающих только две грани упаковываемого аппарата. Остальные грани аппарата 1 защищены от возможных повреждений выступающими частями прокладок 2. Перед упаковкой аппарат может дополнительно помещаться в пакет из полиэтиленовой пленки.

Одна из методик расчета необходимой величины жесткости материала упаковки изложена в стандарте ФРГ [8].

Поясним суть этой методики на конкретном примере.

Задача

Дано: прибор массой 70 кг должен быть упакован так, чтобы максимальное значение возникающего ускорения не превышало 8 g при предполагаемой высоте падения $h = 0,4$ м.

Определить необходимую жесткость упаковочного материала, величину максимального ускорения и собственную частоту прибора упаковке.

Решение

Для решения задачи используются две номограммы (рис. 6.34, 6.35).

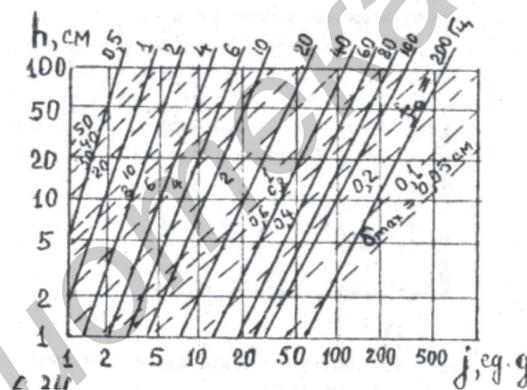


Рис. 6.34. Номограмма для определения собственной частоты прибора в упаковке

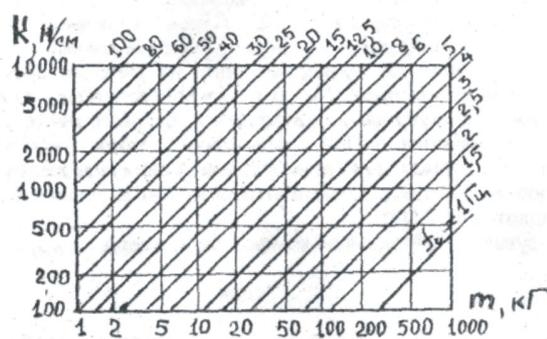


РИС. 6.35. НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ УПАКОВКИ:

m – масса прибора, кг; f_0 – собственная частота прибора в упаковке, Гц;

K – жесткость материала упаковки, Н/см

Используя рис. 6.34, по заданным значениям ускорения ($j = 8g$) и предполагаемой высоты падения ($h = 0,4$ м) находим: $f_0 = 4$ Гц; $\delta = 10$ см.

Используя рис. 6.35, по найденной величине собственной частоты ($f_0 = 4$ Гц) и заданному значению массы прибора ($m = 70$ кг) находим необходимую для защиты прибора величину жесткости материала упаковки: $K = 480$ Н/см.

6.2.8. Методы расчета конструкций с использованием ЭВМ

ЭВМ используются для проведения оценочных расчетов конструкций РЭС при механических воздействиях, например, для расчета систем виброизоляции. Вместе с тем есть методы расчетов, реализация которых без ЭВМ даже для решения простейших задач громоздка, а для расчетов сложных объектов вообще невозможна. К таким методам относят метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных разностей (МКР).

Метод конечных элементов широко используется в подсистемах прочностных расчетов современных САПР в авиационно-космической, судостроительной, строительной и других отраслях промышленности. Суть этого метода состоит в разбиении расчетной модели конструкции на конечные элементы, связанные в отдельных узловых точках. Затем формируются матрицы жесткостей $[K]$, масс $[M]$ и демпфирования $[C]$ для отдельных конечных элементов модели и модели в целом, общий вектор силы $\{P\}$. Математическая модель динамической системы может быть представлена системой дифференциальных уравнений второго порядка, которые в матричной форме имеют вид

$$[M]\{\delta''\} + [C]\{\delta'\} + [K]\{\delta\} = \{P\}.$$

В результате решения полученной системы уравнений определяют собственные частоты и формы колебаний конструкции, а также значения перемещения узлов δ .

При решении статических задач вышеприведенное уравнение упрощается и в общем случае имеет вид

$$[K]\{\delta\} = \{P\}.$$

Применительно же к конструкциям РЭС, где также в отдельных случаях возникает необходимость в проведении прочностных расчетов, в большей степени адаптирован метод конечных разностей, т.к. с его помощью можно решать и другие задачи, типичные для РЭС, например теплообменные.

Для реализации метода конечных разностей необходимо иметь математическую модель – дифференциальное уравнение, описывающее процессы, протекающие в конструкции. Суть метода состоит в записи исходного дифференциального уравнения в разностной форме и в решении его. В качестве примера

рассмотрим функцию $y = f(x)$ (рис. 6.36).

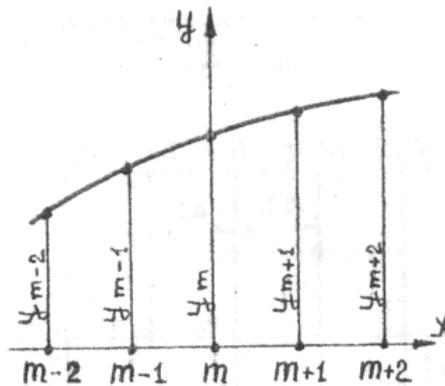


Рис. 6.36. Функция, зависящая от одной переменной

Первая производная для этой функции в разностной форме:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_m \approx \Delta x \xrightarrow{\lim \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)_m = \frac{y_{m+1} - y_m}{\Delta x}.$$

Вторая производная и производные более высокого порядка:

$$\begin{aligned} \left(\frac{d^2 y}{dx^2}\right)_m &= \frac{y_{m+2} - 2y_{m+1} + y_m}{\Delta x^2}; \\ \left(\frac{d^2 y}{dx^3}\right)_m &= \frac{1}{2\Delta x^3} (y_{m+2} - 2y_{m+1} + 2y_{m-1} - y_{m-2}); \\ \left(\frac{d^4 y}{dx^4}\right)_m &= \frac{1}{(\Delta x)^4} (y_{m+2} - 4y_{m+1} + 6y_m - 4y_{m-1} + y_{m-2}). \end{aligned}$$

Для функции W , зависящей от двух переменных x и y :

$$\begin{aligned} \left(\frac{d^4 w}{dx^4}\right)_{m,n} &= \frac{1}{\lambda^4} (W_{m+2,n} - 4W_{m+1,n} + 6W_{m,n} - 4W_{m-1,n} + W_{m-2,n}); \\ \left(\frac{d^4 w}{dy^4}\right)_{m,n} &= \frac{1}{\lambda^4} (W_{m,n+2} - 4W_{m,n+1} + 6W_{m,n} - 4W_{m,n-1} + W_{m,n-2}); \\ \left(\frac{d^4 w}{dx^2 dy^2}\right)_{m,n} &= \frac{1}{\lambda^4} (4W_{m,n} - 2(W_{m+1,n} + W_{m-1,n} + W_{m,n+1} + W_{m,n-1}) + \\ &+ W_{m+1,n+1} + W_{m+1,n-1} + W_{m-1,n+1} + W_{m-1,n-1}). \end{aligned}$$

где λ – шаг разбиения по осям x и y .

Покажем применение метода конечных разностей к прямоугольной пла-

стине.

Дифференциальное уравнение, описывающее поведение пластины, имеет вид

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 2 \left(\frac{d^4 w}{dx^2 dy^2} \right) + \frac{d^4 w}{dy^4} = \frac{P_z(x, y)}{D},$$

где $P_z(x, y)$ – сила, действующая на пластину;

D – цилиндрическая жёсткость пластины (см. п. 6.2.3).

Так как ранее были найдены значения производных, то окончательный вид уравнения в разностной форме для точки (рис. 6.37):

$$\begin{aligned} & \frac{D}{\lambda^4} \left[20W_{m,n} - 8(W_{m+1,n} + W_{m-1,n} + W_{m,n+1} + W_{m,n-1}) + \right. \\ & + 2(W_{m+1,n+1} + W_{m-1,n+1} + W_{m+1,n-1} + W_{m-1,n-1}) + \\ & \left. + W_{m+2,n} + W_{m-2,n} + W_{m,n+2} + W_{m,n-2} \right] = (P_z)_{m,n}. \end{aligned}$$

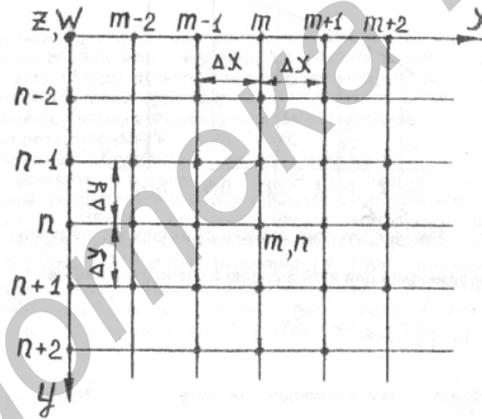


Рис. 6.37. Система координат и расчетные точки

Представим условно это выражение в виде вычислительного шаблона (рис. 6.38).

При анализе поведения пластин под нагрузкой возможны различные варианты закрепления ее сторон (различные варианты граничных условий).

Особенности вариантов закрепления сторон пластин учитываются введением фиктивных точек за пределами их контура (рис. 6.39).

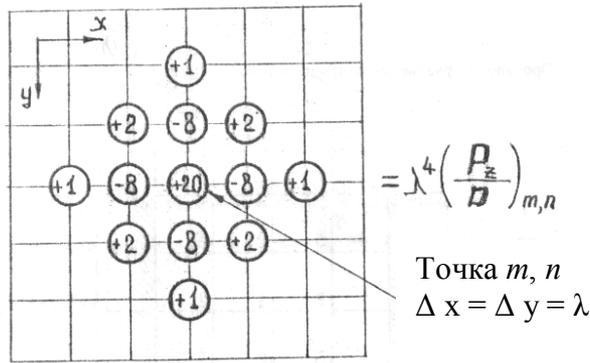


Рис. 6.38. Вычислительный шаблон

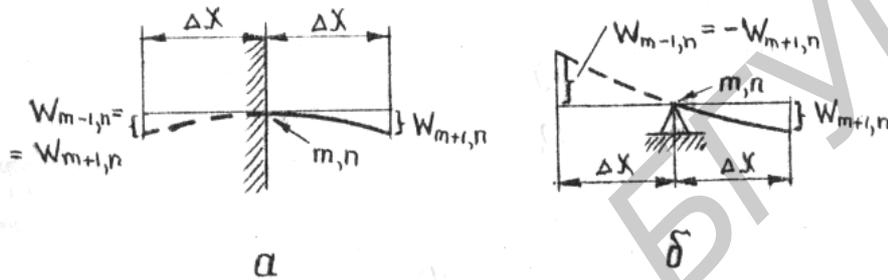


Рис. 6.39. Учет граничных условий при различных вариантах закрепления сторон пластин:
 а – сторона пластины жестко закреплена; б – сторона пластины находится на опоре

Рассмотрим реализацию метода конечных разностей на конкретном примере.

Задача

Квадратная плата с жестким защемлением сторон длиной a подвергается действию статической нагрузки P_0 . Найти прогибы платы от действия нагрузки.

Решение

Производим разбиение платы с шагом $\lambda = \frac{a}{4}$ (рис. 6.40).

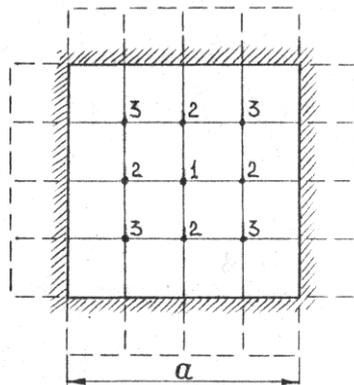


Рис. 6.40. Плата с расчетными точками 1, 2, 3

Как следует из рис. 6.40, достаточно найти прогибы платы в трех точках (w_1, w_2, w_3), а для остальных точек с теми же номерами прогибы будут одинаковы.

Совместив центр вычислительного шаблона с точкой 1, получим следующее распределение коэффициентов (рис. 6.41) и уравнение

$$20w_1 - 32w_2 + 8w_3 = \frac{P_0 a^4}{256D}.$$

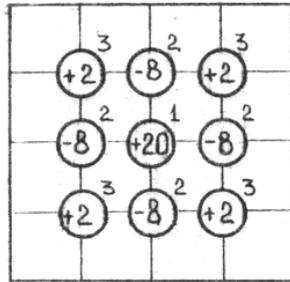


Рис. 6.41. Распределение коэффициентов для точки 1

Совместив центр шаблона с точкой 2 (рис. 6.42), получаем второе уравнение:

$$-8w_1 + 26w_2 - 16w_3 = \frac{P_0 a^4}{256D}.$$

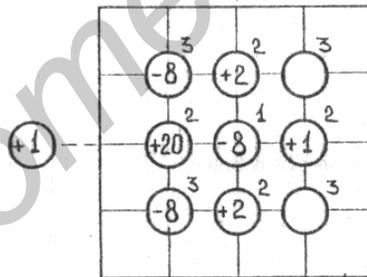


Рис. 6.42. Распределение коэффициентов для точки 2

Для точки 3 (рис. 6.43) получаем третье уравнение:

$$2w_1 - 16w_2 + 24w_3 = \frac{P_0 a^4}{256D}.$$

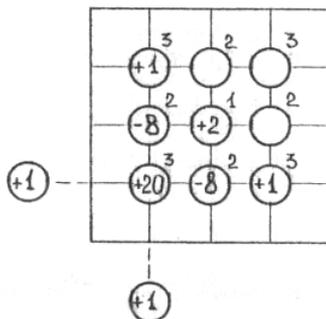


Рис. 6.43. Распределение коэффициентов для точки 3

В итоге получаем систему трех уравнений с тремя неизвестными w_1, w_2, w_3 :

$$\left. \begin{aligned} 20w_1 - 32w_2 + 8w_3 &= \frac{P_0 a^4}{256D} \\ -8w_1 + 26w_2 - 16w_3 &= \frac{P_0 a^4}{256D} \\ 2w_1 - 16w_2 + 24w_3 &= \frac{P_0 a^4}{256D} \end{aligned} \right\}.$$

Решая данную систему уравнений, получим:

$$\begin{aligned} w_1 &= 0,485 \frac{P_0 a^4}{256D}; \\ w_2 &= 0,324 \frac{P_0 a^4}{256D}; \\ w_3 &= 0,221 \frac{P_0 a^4}{256D}. \end{aligned}$$

Такая относительная простота использования МКР для решения практических задач исчезает при анализе объемных элементов конструкций, испытывающих действия динамических сил. Подобные задачи являются наиболее типичными при проектировании РЭС, предназначенных для эксплуатации на подвижных объектах. Используемые в этом случае уравнения теории упругости (уравнения Ламэ) имеют вид

$$(\lambda + 2\mu) \frac{d^2 U}{dx^2} + \mu \left(\frac{d^2 U}{dy^2} + \frac{d^2 U}{dz^2} \right) + (\lambda + \mu) \left(\frac{d^2 V}{dx dy} + \frac{d^2 W}{dx dz} \right) = \rho \frac{d^2 U}{dt^2}$$

и т.д. по остальным двум координатам,

где U, V, W – соответствующие перемещения в направлениях x, y, z ;

ρ – плотность материала;

λ и μ – коэффициенты Ламэ.

Вторая производная по времени в правой части уравнения Ламэ в конечных разностях имеет вид

$$\frac{d^2 U}{dt^2} = \frac{[U(t + \tau) - 2U + U(t - \tau)]}{\tau^2},$$

где τ – шаг по времени.

Более сложный вид исходных дифференциальных уравнений, большее число узлов, появление еще одной переменной – времени, резко усложняет вычислительный процесс. Кроме того, при решении практических задач необходимо осуществить осреднение механических характеристик объекта, учесть потери энергии на внутреннее трение, граничные условия и т.д.

6.2.9. Общие рекомендации по защите РЭС от механических воздействий

Работа конструктора по обеспечению нормального функционирования РЭС в условиях воздействия вибраций начинается с сопоставления допустимых параметров вибраций для пассивных элементов аппаратуры (резисторы, конденсаторы и др.), транзисторов и микросхем с требованиями технического задания на проектирование аппарата.

Если применяемые элементы удовлетворяют требованиям технического задания, то задача состоит в устранении резонансных колебаний конструктивных элементов (обеспечение режима, когда $\mu \approx 1$).

Если же используемые элементы не удовлетворяют требованиям технического задания или возможны резонансные колебания конструктивных элементов аппарата, то следует применять виброизоляцию (обеспечение режима ($\mu < 1$) с последующей оценкой ее эффективности).

Такой же подход при проектировании РЭС рекомендуется применять и для других видов механических воздействий – ударов, линейных нагрузок, акустических шумов.

Приведем пример оценочного расчета РЭС с учетом механических воздействий.

Задача

Блок массой 6 кг установлен на четырех виброизоляторах (нижний монтаж), жесткость каждого из которых $k = 2$ Н/мм. Внутри блока параллельно его основанию жестко по контуру закреплена печатная плата из стеклотекстолита ($\rho = 2 \cdot 10^3$ кг/м³; $k_m = 0,52$; $\delta = 0,06$). Размеры платы $200 \cdot 100 \cdot 1$ мм. Масса ЭРЭ и ИМС, размещенных на поверхности платы, составляет 60 г. Амплитуда и частотный диапазон воздействующей на блок вибрации: $A_0 = 10$ мм; $f_n = 40$ Гц; $f_s = 80$ Гц. Определить возможность использования в составе конструкции элемента, размещенного на поверхности платы, если его собственная частота $f_{os} = 2$ кГц, а допустимая величина вибрационной нагрузки $j_{don} = 10g$.

Решение

1. Поставленную задачу представим в виде следующей физической модели (рис. 6.44).

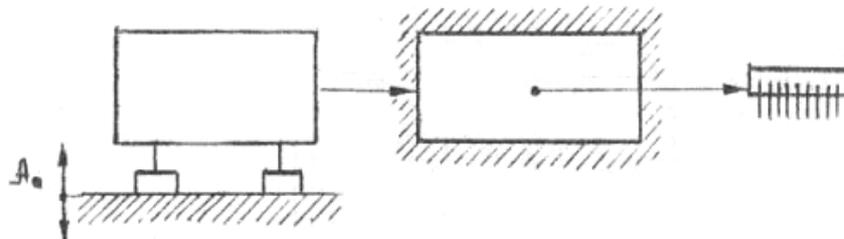


Рис. 6.44. Модель по условию задачи

2. Определим динамические характеристики составляющих модель элементов:

а) собственная частота блока на виброизоляторах

$$f_{o.б} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\Sigma}}{m}} = \frac{1}{6,28} \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot 10^3}{6}} \approx 5,8 \text{ Гц};$$

б) собственная частота печатной платы

$$f_{o.п} = \frac{k_M k_B B h 10^4}{a^2} = \frac{0,52 \cdot 0,6 \cdot 234 \cdot 0,1 \cdot 10^4}{20^2} = 183 \text{ Гц};$$

в) собственная частота элемента

$$f_{o.э} = 2 \text{ кГц (по условию задачи).}$$

3. Определим амплитуду колебаний блока на границах диапазона частот воздействующих вибраций:

$$A_{б} = \frac{A_0}{|1 - a^2|}, \text{ где } a = \frac{f}{f_{o.б}}.$$

$$A_{б.н} = \frac{A_0}{\left|1 - \left(\frac{f_n}{f_{o.б}}\right)^2\right|} = \frac{10}{\left|1 - \left(\frac{40}{5,8}\right)^2\right|} \approx 0,22 \text{ мм};$$

$$A_{б.в} = 0,05 \text{ мм.}$$

Эти величины амплитуд являются базовыми для оценки динамического состояния печатной платы.

4. Определим амплитуды колебаний центра платы на границах диапазона частот воздействующих вибраций:

$$A_{ц.н} = \mu \cdot A_{б.н}.$$

В общем случае

$$\mu = \frac{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2\right) a^2}}{\sqrt{\left(1 - a^2\right)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 a^2}},$$

но так как в нашем случае значение f_0 платы в несколько раз превышает значение частот воздействующих вибраций и ввиду малости δ , можно принять $\mu \approx 1$.

Тогда

$$A_{ц.н} = \mu \cdot A_{б.н} = 0,22 \text{ мм};$$

$$A_{ц.в} = \mu \cdot A_{б.в} = 0,05 \text{ мм.}$$

5. Определим величину вибрационной нагрузки в центре платы на границах диапазона частот воздействующих вибраций:

$$j = 4Af^2;$$

$$j_H = 4 \cdot 0,22 \cdot 10^{-3} 40^2 = 1,4 \text{ g};$$

$$j_B = 4 \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 80^2 = 1,28 \text{ g}.$$

Сравниваем полученные значения вибрационной нагрузки с допустимой условиям задачи ($j_{дон} = 10 \text{ g}$) и делаем вывод о возможности использования элемента в составе данной конструкции.

6.3. Тепловой режим конструкций РЭС

Тепловой режим РЭС характеризуется совокупностью температур всех его элементов. Основные тенденции эволюции современных РЭС в микроэлектронном исполнении:

увеличение сложности и уменьшение габаритов;
повышение требований к стабильности параметров Т.

Эти тенденции противоречивы, так как первая увеличивает напряженность теплового режима, а для выполнения второй надо его облегчать.

В процессе производства, хранения и эксплуатации РЭС могут подвергаться воздействию положительных и отрицательных температур, обусловленных влиянием окружающей среды, объекта установки и тепловыделением самого РЭС. Например, на наземных подвижных объектах диапазон изменения температуры, где могут быть установлены РЭС $-60 \dots +60 \text{ }^\circ\text{C}$. Само РЭС является источником теплоты, так как его КПД менее 100 % (например, для усилителя на транзисторах 50...60 %). Если эту энергию не рассеивать в элементах конструкции или окружающем пространстве, то повышается температура РЭС, нарушается его нормальный режим функционирования или наступает отказ. Температура влияет на многие параметры материалов, ЭРЭ, полупроводниковых приборов, ИМС.

6.3.1. Разновидности теплоотвода – теплопроводность, тепловое излучение, теплопередача конвекцией

Все эти разновидности используются в конструкциях РЭС для отвода тепла от нагретых элементов к холодным и в окружающую среду.

Теплопроводность имеет место при передаче тепла внутри одного элемента или к другому элементу, находящемуся с ним в контакте. Этот процесс теплопередачи определяется законом Фурье, по которому мощность теплового потока, передаваемая в виде тепла, находится из выражения

$$P = \frac{\lambda}{l_T} (T_1 - T_2) \cdot S_T,$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К;

l_T – длина пути теплового потока, м;

T_1, T_2 – соответственно температуры нагретого и холодного тела, К;

S_T – теплопроводящая площадь, м².

Тепловое излучение – передача тепловой энергии в виде электромагнитных колебаний. При попадании на другое тело энергия разогревает его, превращаясь снова в тепловую.

Мощность теплового потока передаваемого излучением определяется законом Стефана-Больцмана и в общем виде определяется соотношением:

$$P_l = \lambda_l (T_u - T_n) \cdot S_u,$$

где λ_l – коэф. передачи тепла излучения, Вт/м²·К;

T_u, T_n – соответственно температура излучающей и нагреваемой поверхности, К;

S_u – площадь излучающей поверхности, м².

Значение коэффициента λ_l зависит от степени черноты излучающей поверхности. Лучистая энергия не только поглощается поверхностью, но и отражается ею. Степень поглощения или отражения зависит от состояния поверхности.

Рекомендации при конструировании РЭС:

теплопроводящие пути выполнять короткими;

в соединениях деталей обеспечивать тепловой контакт по возможно большей площади;

соединяемые теплопроводящие элементы должны быть сжаты между собой, например с помощью винтовых соединений;

теплоотводящие материалы должны иметь большие значения коэффициента теплопроводности.

Отвод тепла с использованием теплопроводности широко используется в конструкциях РЭС при монтаже мощных транзисторов, диодов, ИМС и других элементов. Они крепятся на специальных элементах, называемых радиаторами, или теплоотводящих шинах, от которых тепло, в свою очередь, передается на корпус РЭС и далее – в окружающую среду.

Отвод тепла излучением также широко используется в конструкциях РЭС. Так, например, в целях защиты теплочувствительных элементов от перегрева устанавливают теплопоглощающие или теплоотражающие экраны. Первый имеет матовую, оксидированную поверхность черного цвета или окрашенную эмалевыми или масляными красками. Второй имеет глянцевую поверхность светлых тонов, зеркальную или полированную.

Теплопередача конвекцией происходит в среде воздуха, газа или жидкости, соприкасающейся с нагретыми поверхностями элементов конструкции РЭС.

Процесс теплопередачи конвекцией определяется законом Ньютона:

$$P_k = \lambda_k (T_n - T_c) S_k,$$

где λ_k – коэффициент теплопередачи конвекцией, Вт/м²·К;

T_n – температура нагретого тела, К;

T_c – температура окружающей среды, К;

S_k – площадь тепловыделяющей поверхности, м².

Различают конвекцию свободную (естественную) и принудительную.

Для обеспечения заданного температурного режима модулей РЭС используются системы охлаждения, различающиеся:

- по способу организации системы (индивидуальная, групповая);
- по роду хладагента (воздух, жидкость);
- по способу движения хладагента (естественное, принудительное);
- по виду теплового контакта (с прижимными устройствами, с резьбовым соединением);
- по виду материала теплоотвода (металл, керамика);
- по конструктивному исполнению теплоотвода (односторонний, двухсторонний, объемный);
- по способу передачи теплоты в окружающую среду (без промежуточного теплоносителя и с ним).

6.3.2. Способы охлаждения РЭС

Подавляющее большинство РЭС (свыше 90 %) в настоящее время проектируются с использованием воздушного охлаждения. Воздушное охлаждение может быть естественным или принудительным (рис 6.45).

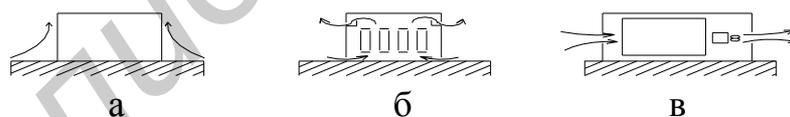


Рис. 6.45. Способы организации воздушного охлаждения:

- а – естественное воздушное охлаждение; б – естественная вентиляция;
- в – принудительная вентиляция

Принудительная вентиляция может быть вытяжной (рис. 6.45, в), приточной или приточно-вытяжной. Эти разновидности вентиляции различаются местом установки вентиляторов и их количеством.

Обычно в блоках с малой тепловой нагрузкой при естественном воздушном охлаждении или естественной вентиляции температура среды внутренних объемов не превышает окружающую более чем на 30 °С. В более теплонагруженных блоках используют принудительную вентиляцию (см. рис. 6.45, в). При необходимости отбора тепла от особо тепловыделяющих элементов, микросборок, модулей может быть использовано циркуляционное жидкостное охлаждение (рис. 6.46). Мощность тепловыделения модулей с жидкостным охлаждени-

ем существенно зависит от скорости прокачки жидкости и повышается с ее увеличением.

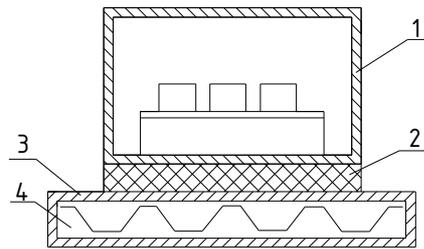


Рис. 6.46. Жидкостное охлаждение модуля РЭС:
1 – модуль РЭС; 2 – слой теплопроводной пасты; 3 – корпус охладителя;
4 – каналы для прокачки жидкости

Еще большей эффективностью теплоотвода характеризуются жидкостно-испарительные системы охлаждения. В таких системах охлаждение осуществляется за счет циркуляции охлаждающей жидкости через радиаторы и рубашки, образованные в корпусах РЭС. Однако такие системы характеризуются большой сложностью и стоимостью.

Для охлаждения РЭС на печатных платах с использованием микросборок и микросхем в герметизируемых корпусах применяются кондуктивные теплостоки в виде теплопроводных шин (рис. 6.47).

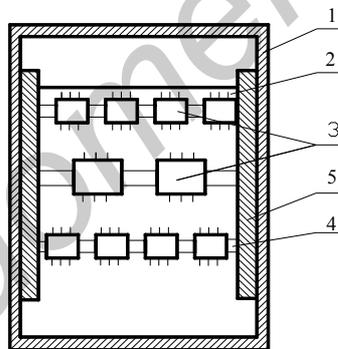


Рис 6.47. Герметичный корпус РЭС с кондуктивными теплостоками:
1 – корпус; 2 – печатная плата; 3 – микросборки; 4 – шины теплостоков;
5 – ТЕПЛОВЫЕ РАЗЪЕМЫ

Для повышения эффективности теплоотвода корпус 1 выполняют оребренным. Кондуктивные теплостоки выполняют из алюминиевых шин 4, оптимальная толщина которых 0,5 мм. Применение кондуктивных теплостоков при естественном воздушном охлаждении позволяет снизить перегрев элементов в 2–3 раза.

В качестве теплостоков при малой мощности тепловых потерь может быть использована и медная фольга печатных плат. Для уменьшения теплового сопротивления корпуса микросхем и микросборок приклеивают к теплостокам.

Дальнейшая передача тепла от теплостоков к корпусу может осуществляться через тепловые разъемы 5. В зарубежных и отечественных разработках применяются в основном конструкции тепловых разъемов с клиновыми зажимами, позволяющими достаточно просто производить смену ячеек (рис. 6.48).

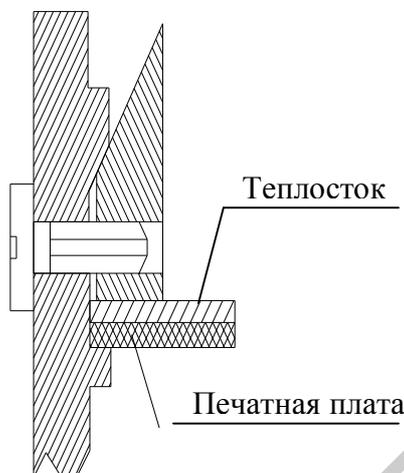


Рис. 6.48. Тепловой разъем с клиновым зажимом

При выполнении модулей первого и нулевого уровней на бескорпусной элементной базе их герметизация может быть выполнена заливкой теплопроводным компаундом. В качестве таких компаундов рекомендованы компаунды марок К-5, ТФК-5, КТЭ-2, КТЭ-4.

Для охлаждения отдельных теплонагруженных элементов РЭС (микросхем, транзисторов, диодов и т.д.) наиболее простой и достаточно эффективный способ – использование радиаторов. Для систем воздушного охлаждения наиболее распространение получили следующие разновидности радиаторов: пластинчатые, ребристые, игольчато-штыревые и др. (рис. 6.49).

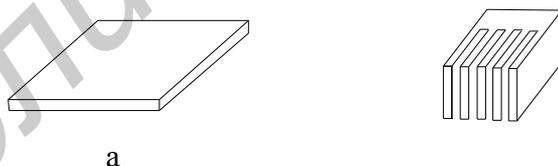


РИС. 6.49. КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ РАДИАТОРОВ:
А – ПЛАСТИНЧАТЫЕ; Б – РЕБРИСТЫЕ

6.3.3. Тепловые трубки и термоэлектрические охладители

Для охлаждения отдельных теплонагруженных элементов РЭС могут использоваться и так называемые тепловые трубки, характеризующиеся простой конструкцией (рис. 6.50).

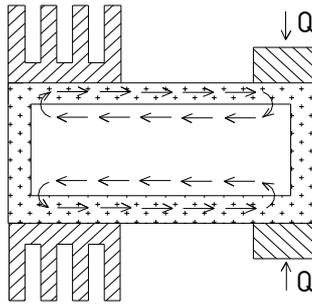


Рис. 6.50. Тепловая трубка

Они имеют герметичный вакуумированный объем. Внутренняя поверхность трубки покрыта слоем капиллярно-пористого материала. Часть внутреннего объема заполнена насыщенным паром рабочей жидкости (ацетон, спирт и др.).

Теплопередача в тепловой трубке происходит за счет поглощения тепла в результате парообразования в нагреваемой части трубки. Нагретый пар конденсируется в охлаждаемой части трубки и отдает тепло стенкам. Пополнение рабочей жидкости в испарительной части трубки происходит за счет постоянного конденсата и передачи рабочей жидкости капиллярно-пористым материалам из охлаждаемой части трубки к нагреваемой.

Для увеличения теплоотводящей способности таких трубок используется оребрение охлаждаемой части трубки.

В особых случаях могут быть использованы термоэлектрические охладители на основе эффекта Пельтье. Суть эффекта состоит в том, что при прохождении постоянного тока в цепи с двумя различными материалами на одном контактом спая тепло поглощается, а на другом – выделяется. Их достоинства – длительный срок службы, бесшумность работы, обратимость процесса охлаждения при изменении полярности источника питания, а недостатки – большие масса и габаритные размеры, необходим источник питания.

6.3.4. Оценочный выбор способов охлаждения РЭС

Блоки РЭС второго или третьего уровня представляют собой сложную систему элементов с множеством внутренних источников теплоты. Точное аналитическое описание таких объектов невозможно из-за громоздкости задачи и неточности исходных данных: мощности тепловых источников, теплофизических свойств материалов, их сложной геометрии и т.д. В связи с этими обстоятельствами на практике используются:

- 1) ориентировочный выбор способа охлаждения на ранней стадии проектирования РЭС;
- 2) приближенные методы анализа и расчета теплового режима модуля РЭС.

Выбор способа охлаждения РЭС на ранней стадии проектирования целесообразно выполнить с помощью специальных графиков, характеризующих области целесообразного применения различных способов охлаждения (рис.6.51).

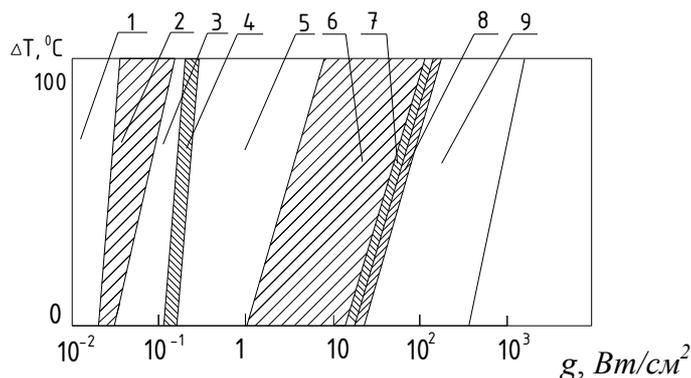


Рис. 6.51. Способы конвективного охлаждения в зависимости от плотности теплового потока (g) и перегрева (ΔT)

Различают два типа областей (см. рис. 6.51):

1. Области, в которых можно рекомендовать применение определенного способа охлаждения.
2. Области, в которых можно применять (по выбору) два или даже три способа охлаждения.

Области первого типа не заштрихованы и относятся к следующим способам охлаждения: 1 – естественное воздушное; 3 – принудительное воздушное; 5 – принудительное жидкостное; 9 – принудительное испарительное.

Области второго типа заштрихованы: 2 – естественное и принудительное воздушное; 4 – принудительно воздушное и жидкостное; 6 – принудительное жидкостное и естественное испарительное; 7 – принудительное жидкостное, принудительное и естественное испарительное; 8 – естественное и принудительное испарительное.

Основным показателем, определяющим область целесообразного применения способа охлаждения, принимается значение плотности теплового потока, проходящего через поверхность теплообмена:

$$g = \frac{P}{S_n}, \quad (6.1)$$

где P – суммарная мощность, рассеиваемая РЭС с поверхности теплообмена;
 S_n – поверхность теплообмена РЭС.

Для блока прямоугольной формы

$$S_n = 2[L_1 \cdot L_2 + (L_1 + L_2) \cdot L_3] \cdot K_3, \quad (6.2)$$

где K_3 – коэффициент заполнения объема блока РЭС.

$$K_3 = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{V}, \quad (6.2)$$

где V_i – объем i -го компонента РЭС;

n – число компонентов;

V – общий объем РЭС;

L_1, L_2, L_3 – размеры сторон корпуса РЭС.

Вторым показателем является минимально допустимый перегрев компонентов в блоке РЭС:

$$\Delta T_c = T_{min} - T_c, \quad (6.3)$$

где T_{min} – допустимая температура поверхности наименее теплостойкого элемента;

T_c – температура окружающей среды.

Для естественного охлаждения $T_c = T_{c\ max}$, т.е. соответствует максимальной температуре окружающей среды. Для принудительного охлаждения $T_c = T_{ex}$, т.е. соответствует температуре охлаждающего воздуха (или жидкости), используемого в системе охлаждения РЭС.

6.4. Защита конструкций РЭС от воздействия влаги

6.4.1. Источники и пути проникновения влаги

Конструкции РЭС подвергаются воздействию влаги в процессе производства, хранения и эксплуатации.

Источники влаги: 1) окружающая среда; 2) внутренняя среда гермоблоков; 3) материалы конструкций; 4) технологические жидкости (травители, моющие средства и др.).

Окружающая среда. Максимально возможное содержание влаги в воздухе зависит от температуры и давления. При понижении температуры влажного воздуха ниже уровня, соответствующего максимально возможному содержанию влаги (точке росы), избыток влаги выпадает в виде конденсата (росы).

Внутренняя среда гермоблоков. Причины наличия влаги:

проникновение ее через микропоры из внешней среды;
невозможность полной осушки (без влагопоглотителя);
наличие влаги в материалах конструкции.

Материалы конструкции. Особо интенсивные источники влаги – полимерные материалы (стеклотекстолит, гетинакс, клей, покрытия и т.д.). Они в процессе производства и хранения поглощают влагу из воздуха, а при нагреве в процессе эксплуатации выделяют ее.

Технологические жидкости – это источники влаги и загрязнений, усиливающие действие влаги.

6.4.2. Взаимодействие влаги с материалами конструкций

Поглощение влаги обусловлено тем, что некоторые материалы имеют поры, размеры которых значительно превышают размеры молекул влаги воды – $3 \cdot 10^{-10}$ м; полимеры – 10^{-9} м; керамика – 10^{-5} м.

С металлами влага вступает в химическое взаимодействие, вызывающее коррозию. Действие влаги усиливается при контакте с сильно различающимися

электрохимическими потенциалами, а также в местах сварных швов. Воздействие влаги на материалы и компоненты может привести к постепенным или внезапным отказам РЭС.

Увлажнение органических материалов приводит к следующим эффектам:
увеличивается диэлектрическая проницаемость среды и потери ($\text{tg } \delta$);
уменьшаются объемное сопротивление, электрическая и механическая прочность;

изменяются геометрические размеры и формы;

изменяются свойства смазок.

Возможные последствия:

увеличение емкости конденсаторов и уменьшение добротности контуров;

снижение пробивного напряжения диэлектриков;

нарушение паяных и сварных швов;

расслоение диэлектриков;

разрушение защитных покрытий и т.д.

6.4.3. Способы влагозащиты РЭС

Средства защиты РЭС от влаги приведены на рис. 6.52.

Монолитные оболочки составляют единое целое с защищаемым узлом.

Полые оболочки не имеют контакта с защищаемыми компонентами – исключен тепловой контакт и химическое взаимодействие оболочки и компонентов. Они более надежны, но имеют большие габариты, массу и стоимость.

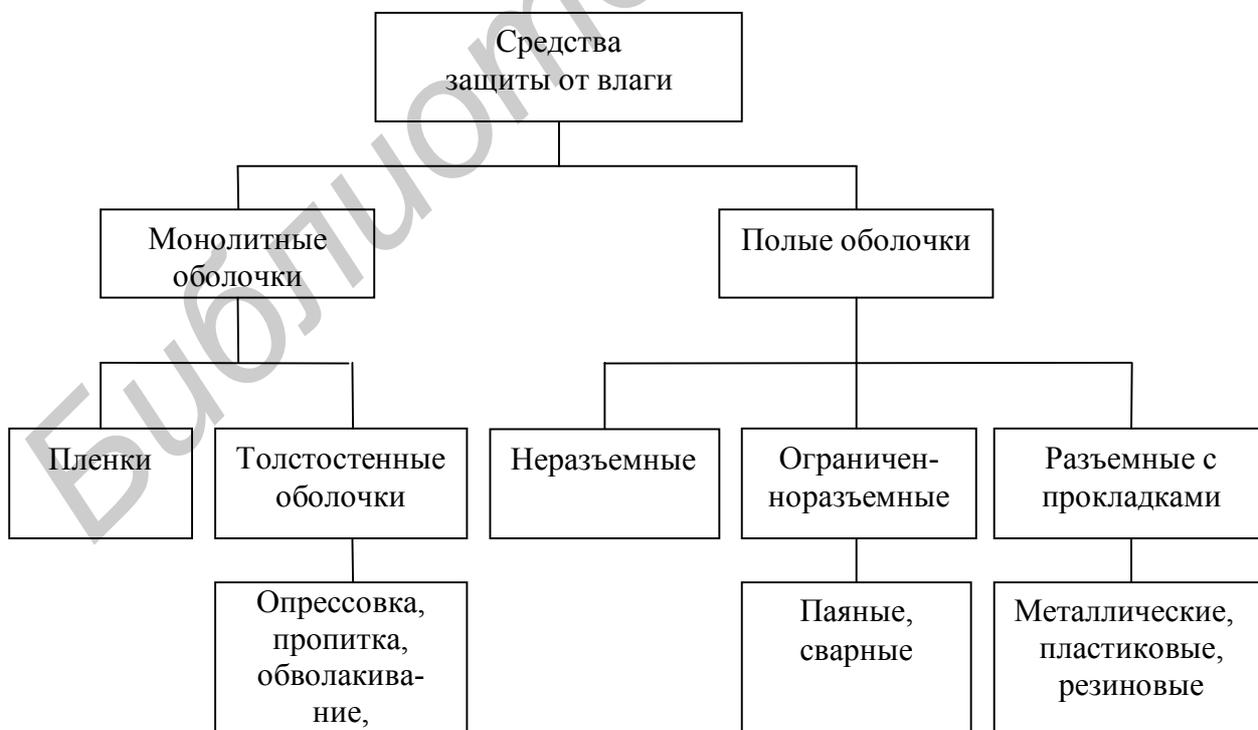


Рис. 6.52. Средства защиты РЭС от влаги

6.4.4. Покрытия для защиты от коррозии

Для защиты от коррозии несущих корпусных узлов из металлов и сплавов применяют монокристаллические покрытия. Они наносятся чаще всего гальваническим способом. Толщина покрытий – единицы – десятки микрометров.

В ряде случаев защитное покрытие для стали делают многослойным, например:

слой меди 6...10 мкм;

слой никеля 3...6 мкм (высокая твердость);

слой хрома 0,5 мкм (гидрофобность).

Различают два вида покрытия – катодное и анодное.

Если электродный потенциал металла покрытия более положительный, чем основного металла, то покрытие называют катодным, а если наоборот – анодным. Катодные покрытия защищают основной металл лишь механически, изолируя его от внешней среды, а анодные – и электрохимически. Продукты разрушения заполняют поры, и процесс разрушения замедляется.

Таблица 6.4

Электрохимические потенциалы металлов (для водной среды)

Металл	Электрохимический потенциал, мВ
Серебро	+194
Медь	+140
Никель	+118
Алюминий	-169
Олово	-175
Свинец	-283
Сталь	-350
Кадмий	-574
Цинк	-823

В конструкторской документации на изделие указывается материал покрытия, его толщина, последовательность нанесения слоев. Например, медно-никелево-хромовое покрытие, служащее защитой от коррозии и декоративной отделкой, обозначается М24Н12Х (толщина меди 24 мкм, никеля – 12 мкм, хрома – до 1 мкм).

Металлические несущие конструкции защищают от влаги и с помощью лакокрасочных покрытий. Такие покрытия вследствие химической инертности обладают лучшими антикоррозийными свойствами, чем металлические, но механическая прочность и влагостойкость их меньше.

6.4.5. Влагозащитные монолитные оболочки

Пленочные монолитные оболочки имеют толщину 0,2...20 мкм. Требования к материалам защитных пленок:

хорошие влагозащитные свойства;

возможность работы в диапазоне температур (близость ТКЛР-пленки и защищаемого элемента, эластичность);

хорошая адгезия к защищаемому компоненту;

Толстостенные монолитные оболочки могут выполнять и функцию несущей конструкции для внешних выводов (рис. 6.52).

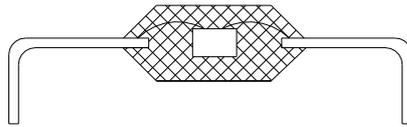


Рис. 6.52. Монолитный полимерный корпус ИС

Технологические процессы получения оболочек – пропитка, заливка, обволакивание и опрессовка. Используемые для этой цели материалы – пропиточные лаки, пенопласт, компаунды, пресс-материалы.

6.4.6. Влагозащитные полые оболочки

Полые влагозащитные оболочки применяют для защиты компонентов и узлов РЭС (ИС, микросборок), в качестве дополнительной защиты от влаги наземных РЭС на корпусированных элементах, для бортовых РЭС на бескорпусных элементах, для аппаратуры диапазона СВЧ.

Применение полых оболочек позволяет:

исключить механический контакт оболочек с защищаемым изделием;

устранить химическое взаимодействие оболочки с защищаемым изделием;

улучшить теплоотвод (при использовании оболочек, теплопроводность которых выше теплопроводности полимеров);

повысить надежность влагозащиты;

обеспечить электромагнитное экранирование (при использовании металлической оболочки или из металлизированной керамики);

ослабить паразитные связи при замене полимера воздухом.

Разновидности полых влагозащитных оболочек:

1. Полимерные полые оболочки. Состоят из пластмассового основания и приклеиваемой пластмассовой крышки. Их достоинство – дешевизна, а недостаток – слабая степень защиты. Применяются для наземных РЭС, работающих в отапливаемых помещениях.

2. Полые неразъемные металлополимерные оболочки. Они характеризуются высокой эксплуатационной надежностью и используются в качестве корпусов некоторых разновидностей интегральных схем (рис. 6.53).

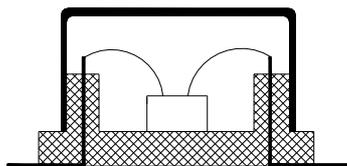


Рис. 6.53. Корпус ИС на основе металлополимерной оболочки

Из-за низкой теплопроводности полимерных материалов для улучшения отвода тепла в подобных конструкциях корпусов ИС используют теплопроводящие шины.

3. Полые неразъемные металлокерамические и металlostеклянные оболочки (рис. 6.54). Они также характеризуются высокой надежностью, но и высокой стоимостью из-за использования дорогих и дефицитных материалов (молибден, палладий, золото, ковар).

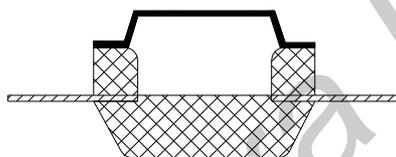


Рис. 6.54. Конструкция металlostеклянного корпуса

Для обеспечения нормального функционирования подобных корпусов в широком диапазоне температур необходимо обеспечивать согласованные герметичные металlostеклянные спаи. Для стекла таким материалом для образования согласованного спая является, например, ковар.

4. Ограниченно-разъемные полые оболочки. Они представляют собой составной металлический корпус с паяным или сварным швом (рис. 6.55).

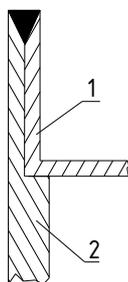


Рис.6.55. Сварной шов:
1 – корпус; 2 – крышка

Сварка осуществляется по вершине кромок. При необходимости сварной шов можно удалить точением или фрезерованием с последующей повторной сваркой.

6.4.7. Влагозащита с использованием герметизирующих прокладок

Использование прокладок упрощает герметизацию и разгерметизацию блока, что удобно как на этапе производства (при регулировке и настройке), так и на этапе эксплуатации (при ремонте). В качестве материала уплотняющих прокладок можно использовать полимеры (резина, пластмасса) и металлы (медь, алюминий, свинец). Достоинствами уплотняющих прокладок из пластмассы являются их низкая стоимость и стойкость в агрессивных средах, а недостатком – относительно низкая температурная стойкость. Металлические прокладки работоспособны в более широком диапазоне температур ($-250\dots+150^{\circ}\text{C}$). Пример конструктивного исполнения уплотняющей прокладки для корпуса РЭС показан на рис. 6.56.

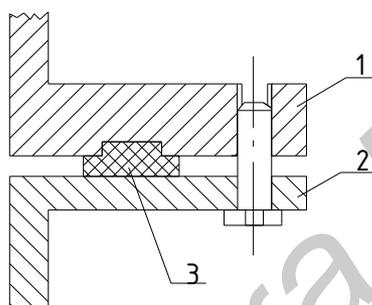


Рис. 6.56. Конструктивное исполнение уплотнения с помощью прокладки:
1 – корпус блока; 2 – крышка; 3 – прокладка

С течением времени влага может проникать во внутреннюю среду гермоблока, а при понижении температуры – конденсироваться на компонентах РЭС и стенках гермоблока. Существует несколько способов, позволяющих снизить количество влаги в гермокорпусе или предотвратить ее конденсацию:

использование материалов с малым влагопоглощением;

предварительная осушка внутренней среды гермоблока в процессе производства;

осушка при эксплуатации с помощью специальных влагопоглотителей и др.

Наиболее эффективным способом осушки в период эксплуатации является использование влагопоглотителей, а наиболее перспективные вещества для этой цели – цеолиты, обладающие высокой скоростью поглощения влаги.

6.4.8. Герметизация соединителей

Внешние электрические связи герметичного блока обеспечиваются с помощью металлостеклянных гермовводов (рис. 6.57).

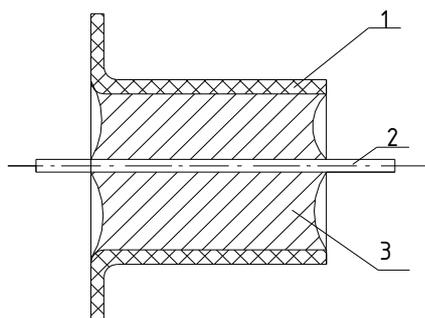


Рис. 6.57. Гермоввод:

1 – оболочка из ковара; 2 – проводник из ковара; 3 – стеклянный изолятор

Они впаиваются в посадочные места корпуса по оболочке 1. Высокочастотные соединители оплавляются по периметру, а низкочастотные – вводятся с помощью полимерной герметизации (рис. 6.58).

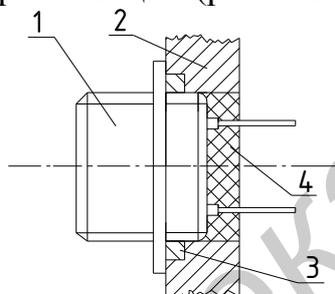


Рис.6.58. Вариант герметизации вилки соединителя с помощью уплотнительной прокладки и компаунда:

1 – вилка соединителя; 2 – корпус блока; 3 – уплотнительная прокладка;
4 – компаунд

6.4.9. Технологичность конструкции влагозащиты

Трудоемкость обеспечения влагозащиты составляет 20...40 % общей трудоемкости изготовления РЭС. Технологичность влагозащитной конструкции определяется:

выбором наиболее экономичного метода защиты для данных условий эксплуатации и производства;

уровнем типизации и унификации выбранного конструкторского решения; выбором материалов и способов их обработки.

Если РЭС эксплуатируется в отапливаемых помещениях (бытовая аппаратура, ЭВМ широкого применения), то наиболее экономичной является влагозащита компонентов и узлов с помощью полимерных монолитных оболочек при отсутствии общей герметизации устройства.

В случае повышенных требований к герметичности компонентов, интенсификации теплоотвода, обеспечения электромагнитного экранирования целесообразно использовать более дорогие металлокерамические или металlostеклянные оболочки. Корпус РЭС в этом случае может быть негерметичным. Если

в составе РЭС имеются бескорпусные компоненты (обычно это бортовые РЭС), то изделие выполняется в виде гермоблока.

На выбор влагозащитной конструкции влияние оказывает и объем производства. Для единичного или мелкосерийного производства могут быть выбраны методы, не требующие дорогого оборудования и специального оснащения: обволакивание окунанием или пульверизацией, заливка, пропитка. При массовом производстве необходимо использовать высокопроизводительные методы: опрессовку полимерами, обработку деталей штамповкой, прессованием, литьем под давлением.

Технологичность влагозащитной конструкции повышается при использовании типовых конструкций, технологические процессы изготовления которых хорошо оснащены и отработаны [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методология конструирования РЭС продолжает совершенствоваться в связи с ростом степени интеграции элементной базы и из-за стирания четких границ между системотехническим, схемотехническим, конструкторским и технологическим проектированием. Внедрение РЭС во все сферы человеческой деятельности, встраивание в различные конструкции машин, приборов и оборудования порождает огромное количество конструкторско-технологических решений, что снижает эффективность их использования: замедляет темпы разработки, производства и внедрения, снижает серийноспособность, повышает стоимость и т.д.

Решением этой проблемы может быть межвидовая унификация машин, приборов и оборудования, обеспечивающая вариантность по физическим и электрическим параметрам, гармоничное сочетание различных конструктивных единиц без дополнительных расходов на стыковку, соответствие международным стандартам и т.д.

Перечень проблем решение которых потребует в ближайшие годы усилий конструкторов, технологов и экономистов, можно было бы и продолжить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированное проектирование узлов и блоков РЭС средствами современных САПР: Учеб. пособие для вузов / И.Г. Мироненко и др.; Под ред. И.Г. Мироненко. – М.: Высш. шк., 2002.

2. Каленкович Н.И. Проектирование РЭС с учетом механических воздействий. Учеб. пособие по курсу «Конструирование радиоэлектронных средств» для студ. спец. «Проектирование и производство радиоэлектронных средств». – Мн.: БГУИР, 1999.

3. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева и др.; Под ред. В.А. Шахнова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.

4. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств: Учебник для радиотехн. спец. вузов.– М.: Высш. шк., 1990.

5. Основы конструирования изделий радиоэлектроники: Учеб. пособие по курсу «Основы конструирования изделий радиоэлектроники» для студ. спец. Э.03.01.00 «Экономика и управление предприятием» дневной и заочной форм обучения / Ж.С. Воробьева, Н.С. Образцов, И.Н. Цырельчук и др. – Мн.: БГУИР, 2001.

6. Пикуль М.И. и др. Конструирование и технология производства ЭМВ: Учебник / М.И. Пикуль, И.М. Русак, Н.А. Цырельчук. – Мн.: Высш. шк., 1996.

7. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА: Справ. пособие /Э.Т. Романычева, А.К. Иванова, А.С. Кумеков.– М.: Радио и связь, 1984.

8. Стандарт ФРГ – VDI/VDE 2256, Blatt2, Feinwerkelemente, Dämpfungen, Stoßdämpfungen, Januar 1988.

9. Шимкович А.А. Конструирование несущих конструкций РЭС и защита их от дестабилизирующих факторов. Ч.1.: Учеб. пособие по курсу «Конструирование радиоэлектронных устройств» для студентов специальности «Проектирование и производство радиоэлектронных средств». В 2 ч. Ч. 1. – Мн.: БГУИР, 1999.

Учебное издание

**Каленкович Николай Иванович,
Образцов Николай Сергеевич,
Ткачук Аркадий Мефодьевич**

**ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей I-01 03 00
«Экономика и управление на предприятии»
и I-02 02 00 «Маркетинг»
дневной и заочной форм обучения

Редактор Т.А. Лейко
Корректор Е.Н. Батурчик

Подписано в печать 10.04.2006.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 8,4.

Формат 60x84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 300 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,95.
Заказ 684.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131518 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровка, 6