



Кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры

# Разработка технического задания и технических предложений на проектирование РЭС



Томск 2016

**Кобрин Юрий Павлович**

**Разработка технического задания и технических предложений на проектирование РЭС.**

Учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию по дисциплине «Автоматизированное проектирование РЭС» для студентов специальности «11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств». - Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), кафедра КИПР, 2016. – 83 с.

Чтобы сокращение срока обучения на один год (по сравнению со специалитетом) в меньшей мере сказывалось на уровне и качестве подготовке выпускника профиля «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», способного компетентно решать весь комплекс проблем разработки систем, схем, конструкций и технологий в сфере электронного приборостроения, необходимы учебные пособия, в сжатом виде, но в то же время достаточно полно отражающие эти проблемы.

Рассмотрены вопросы разработки технического задания (ТЗ) на проектирование радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения с применением на всех этапах информационных технологий. Приведены необходимые теоретические и справочные данные, необходимые для анализа ТЗ и формирования технических предложений по проектированию РЭС, что позволяет свести к минимуму потребность в дополнительной литературе.

Учебное пособие предназначено для помощи в подготовке бакалавров и магистрантов в области разработки и исследования РЭС различного назначения, выполнения курсовых и дипломных проектов, но может быть использовано и студентами других специальностей радиотехнического профиля.

©Кафедра КИПР федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)», 2016.

© Кобрин Ю.П. 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1</b>	<b>Разработка технического задания .....</b>	<b>3</b>
1.1	Цели и задачи курсового проекта.....	3
1.1.1	Основными задачами курсового проектирования являются: .....	3
1.1.2	При разработке проекта необходимо знать и учитывать: .....	3
1.1.3	В ходе курсового проектирования студент должен научиться: .....	3
1.2	Задание на курсовое проектирование .....	4
1.3	Формирование технического задания .....	7
<b>2</b>	<b>Разработка технических предложений.....</b>	<b>12</b>
2.1	Анализ технического задания и выбор вариантов конструктивно-технологических решений.....	12
2.1.1	Анализ назначения и условий эксплуатации РЭС .....	12
2.1.2	Анализ схмотехнических требований и ограничений .....	16
2.1.3	Анализ способов охлаждения .....	22
2.1.4	Анализ климатических воздействий.....	36
2.1.5	Анализ радиационных воздействий.....	49
2.1.6	Анализ механических воздействий .....	52
2.1.7	Анализ безопасности эксплуатации .....	63
2.1.8	Анализ эстетических и эргономических показателей конструкции .....	71
2.1.9	Технико-экономические показатели .....	74
<b>3</b>	<b>Список литературы.....</b>	<b>76</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Бланк индивидуального задания.....</b>	<b>80</b>

# 1 Разработка технического задания

## 1.1 Цели и задачи курсового проекта

Курсовое проектирование по дисциплине «Информационные технологии проектирования РЭС» имеет целью подготовить студентов к самостоятельному решению проектно-конструкторских задач при выполнении дипломного проекта и к последующей работе после окончания университета.

### 1.1.1 Основными задачами курсового проектирования являются:

- 1) систематизация, расширение и углубление теоретических знаний комплексного решения схемотехнических, конструкторских и графических задач создания проектов современных РЭС;
- 2) развитие и закрепление практических навыков использования компьютеров для решения основных задач, возникающих в ходе разработки конструкторской и технологической документации при проектировании РЭС;
- 3) приобретение опыта по поиску информации в Интернет, работы с технической литературой, с нормативно-технической документацией, и в особенности, со стандартами Единой системы конструкторской документации (ЕСКД);
- 4) подготовка к самостоятельному успешному решению конструкторских задач при выполнении дипломного проекта и последующей работы на промышленных предприятиях.

### 1.1.2 При разработке проекта необходимо знать и учитывать:

- 1) назначение и принципы действия разрабатываемого РЭС и возможности его использования;
- 2) влияние на электрические параметры физических процессов, протекающих в РЭС;
- 3) информационные технологии проектирования конструкций и технологических процессов изготовления РЭС;
- 4) условия эксплуатации РЭС и методы защиты их от дестабилизирующих факторов (теплообменные процессы, вибрации и удары, воздействие электромагнитных полей, радиации, влаги и т.д.);
- 5) свойства материалов и их проявления в различных условиях эксплуатации;
- 6) особенности компоновок РЭС;
- 7) технологию проектирования и изготовления печатных плат (ПП), печатных узлов (ПУ), отдельных деталей и сборочных единиц;
- 8) вопросы стандартизации, унификации и технологичности;
- 9) правила оформления конструкторской документации и многое другое.

### 1.1.3 В ходе курсового проектирования студент должен научиться:

- 1) разрабатывать технические задания для проектирования РЭС;
- 2) разрабатывать требования к конструкции детали и сборочной единицы РЭС, используя технические условия (ТУ), стандарты, технологические и экономические и т.п. показатели качества;

- 3) оценивать технологичность конструкции детали и изделия РЭС в целом;
- 4) осуществлять проектирование печатных плат (микросборок) по заданной принципиальной схеме, технологическим, экономическим и другим показателям;
- 5) выполнять расчёты, связанные с проектированием конструкций РЭС, с помощью компьютера;
- 6) анализировать результаты расчёта и принимать соответствующие конструкторские решения с целью обеспечения параметров РЭС;
- 7) разрабатывать графическую и текстовую документацию на сконструированные изделия с использованием информационных технологий;
- 8) пользоваться технической литературой (справочниками, стандартами и другими нормативно-техническими документами (НТД), применяемыми на промышленных предприятиях)

## 1.2 Задание на курсовое проектирование

Предметом курсового проектирования является разработка конструкции законченных РЭС разнообразного функционального назначения, имеющих отдельную принципиальную схему. Проектируемое изделие может иметь самостоятельное применение, а может являться частью сложного РЭС.

В начале семестра преподаватель-руководитель проекта выдаёт каждому студенту **индивидуальное задание на курсовое проектирование**. В нем указываются срок выдачи задания, сроки проведения промежуточного контроля выполнения отдельных этапов проектирования и дата защиты проекта.

Задание оформляется на специальном бланке (см. ПРИЛОЖЕНИЕ А. Бланк индивидуального задания), в котором содержатся:

- тема проекта;
- исходные данные к проекту;
- перечисляются этапы работ;
- объем и содержание альбома конструкторской документации;
- объем и содержание расчётно-пояснительной записки;
- рекомендуемая литература;
- дополнительные указания к проекту.

**Тема проекта.** В ходе курсового проекта необходимо разработать конструктивно-законченное РЭС всевозможного назначения (медицинские и бытовые приборы, устройства автоматики и управления, контрольно-измерительная аппаратура, радиоприёмники, радиопередатчики, усилители, источники вторичного электропитания и т.п.) с автономным или сетевым питанием, органами индикации и управления, выполненное в отдельном корпусе. Темы курсовых проектов целесообразно выбирать актуальными, с элементами научно-исследовательской работы. Это позволит повысить активность и ответственность студентов за своевременное выполнение проекта.

При выборе темы проекта рекомендуется отдавать предпочтение изделиям, содержащие в составе не более 50 электрорадиоэлементов (ЭРЭ).

### Поощряются реальные темы курсовых проектов.

По конструктивной сложности разрабатываемое РЭС должно быть не ниже 2-го структурного уровня (Рис. 1.1) [1] и выполнено с учётом стадий проектирования по ЕСКД.

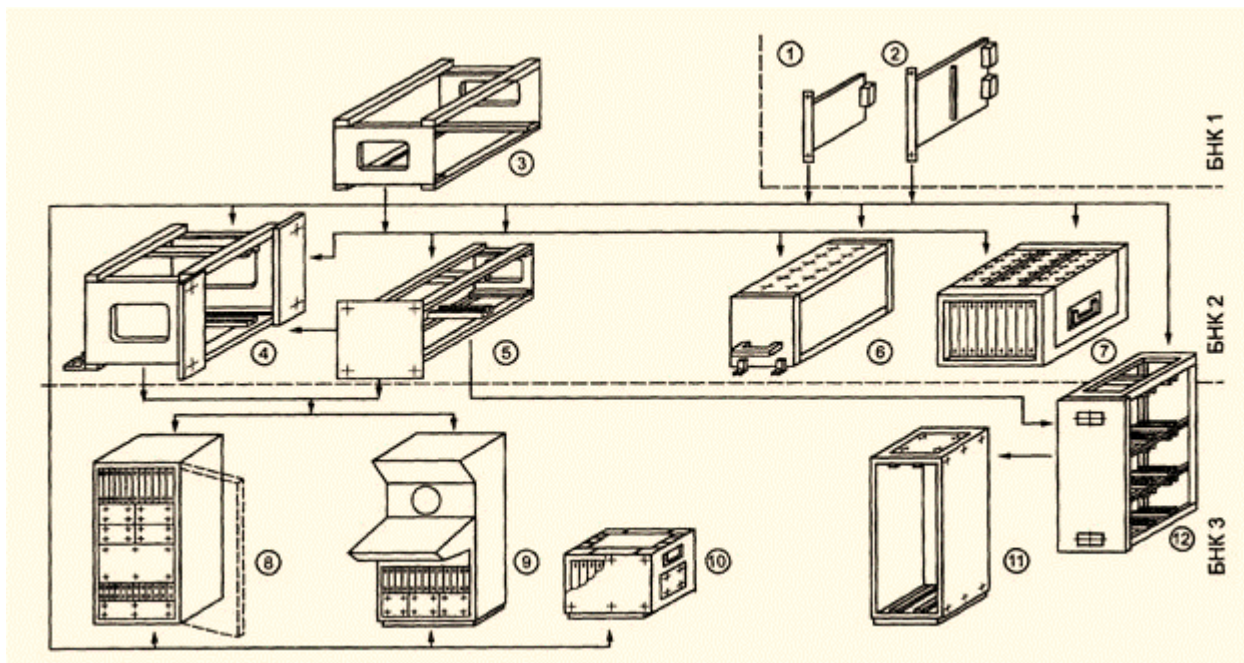


Рис. 1.1 – Иерархическая система построения базовых несущих конструкций (БНК) по ГОСТ Р 51623-2000

1, 2 - ячейки; 3 - корпус блока; 4 - блочный каркас; 5 - корпус вставного блока; 6 - корпус блока (авиационного); 7 - корпус контейнера (авиационного); 8 - корпус шкафа; 9 - корпус пульта; 10 - корпус моноблока; 11 - корпус шкафа для выдвижной стойки; 12 - выдвижная стойка

**Исходные данные к проекту.** Исходными данными для выполнения проекта являются:

1) схема электрическая принципиальная изделия с описанием работы, с перечнем входящих ЭРЭ и их параметров;

2) электрические требования с указанием данных, наиболее характерных для разрабатываемого устройства (например, для радиоприёмного устройства: чувствительность, избирательность, рабочий диапазон частот и другие; для радиопередающего устройства - стабильность частоты, выходная мощность, рабочий диапазон частот и т.д.);

4) условия эксплуатации РЭС в зависимости от климатических особенностей местностей, где они будут работать, рода объекта (корабль, самолёт, спутник и т.д.) и других причин задаются указанием в расширенном техническом задании конкретных количественных показателей воздействий. Например, бортовая самолётная РЭС: устойчивость к климатическим воздействиям, условия хранения и транспортирования по ГОСТ 15150-69 [2], к механическим - по ГОСТ 16019-2001 [3];

5) технико-экономические требования (группа потребителей разрабатываемого РЭС<sup>1</sup>, его новизна и конкурентоспособность), позволяющие получить заданные преимущества и выгоды от внедрения создаваемого РЭС (стоимость, серийность, технологичность, уровень унификации и стандартизации и т.д.).

**Объем и содержание графических работ.** Графическая часть проекта включает комплект чертежей на разрабатываемую ПП объемом не менее 7 листов формата А4 по ГОСТ 2.301-68, выполненных с использованием компьютера:

- 1) исходная схема электрическая принципиальная проектируемого РЭС (или схема из источника проектирования) с указанием применяемых ЭРЭ;
- 2) схема электрическая принципиальная проектируемого печатного узла РЭС и перечень ЭРЭ к ней (*P-CAD*) [4,5,6,7,8,9], *Altium Designer* [10,11,12], *КОМПАС-3D* [13,14]);
- 3) чертёж печатной платы (*P-CAD*, *Altium Designer*, *КОМПАС-3D* и др.);
- 4) сборочный чертёж печатного узла и спецификация к нему (*P-CAD*, *Altium Designer*, *КОМПАС-3D*);
- 5) чертёж общего вида проектируемого РЭС с использованием *CAM Solid Works*.

**Объем и содержание расчётно-пояснительной записки.** Расчётно-пояснительная записка должна состоять не менее из 20 печатных листов, выполненных с использованием текстового процессора Word или схожего по возможностям.

**Рекомендуемая литература.** Руководитель проекта указывает литературу, которую целесообразно использовать студенту при разработке конструкции РЭС.

**Дополнительные указания к проекту.** Этот раздел используется руководителем проекта для включения дополнительных требований к проекту исследовательского характера. Очевидно, что первоначальный выбор большинства характеристик (тип платы или микросборки, её габаритные размеры, соединители, параметры печатных проводников элементная база и т.п.) в процессе проектирования итерационно уточняется и изменяется. Дополнения, которые появляются у студента при работе над курсовым проектом, также включают в этот раздел.

Конструктивно-технологический вариант исполнения РЭС согласовывается студентом, выполняющим проект, с руководителем курсового проектирования. Содержание проектно-конструкторских и технологических задач, решаемых в проекте, определяется вариантом исполнения конструкции РЭС.

---

<sup>1</sup> К 1-й группе относится аппаратура, стоимость которой должна быть минимальной. В основном это РЭС бытового назначения.

К 2-й группе относится аппаратура, стоимость разработки и производства которой имеет существенное, но не первостепенное значение (медицинская аппаратура, радиостанции низовой народнохозяйственной радиосвязи и др.).

К 3-й группе относится аппаратура, к которой предъявляются жёсткие требования по обеспечению заданных технических характеристик.

После анализа студентом индивидуального задания на курсовое проектирование и уточнения совместно с руководителем проекта объёма и содержания работ, необходимо разработать **расширенное техническое задание (ТЗ)** на проектирование РЭС.

Поскольку цикл разработки РЭС включает в себя довольно много этапов и процедур и на каждом этапе нужно учитывать большое количество факторов, то разумно более конкретно подвергнуть рассмотрению методику проектирования РЭС на основе информационных технологий.

### 1.3 Формирование технического задания

Проектирование РЭС на основе информационных технологий базируется на учёте всех требований и ограничений, найденных в ходе системного анализа, и оформленных в виде **технического задания (ТЗ, техзадание)** — которое является исходным документом для разработки. Без ТЗ проектирование никогда не осуществляется, так как не определены его цели.

**Техническое задание** на проектируемое РЭС формируется студентом на основании индивидуального задания на курсовое проектирование. Оно является основным документом для принятия решений на последующих этапах и устанавливает основное назначение разрабатываемого РЭС, его технические характеристики, показатели качества и технико-экономические требования. Оно также содержит необходимые ограничения, связанные с условиями эксплуатации (климатические, механические, биологические воздействия), объектом установки (стационарная, возимая, носимая и т. д.), обслуживания (эргономические и эстетические факторы), производства РЭС (серийность выпуска, показатели технологичности), принципами функционирования (требования безопасности и помехозащищённости), указания по выполнению необходимой документации (конструкторской, технологической и т. д.) и её составу, сроки проектирования

Текст ТЗ должен быть кратким, чётким и однозначным, т.е. не допускать различных толкований. При формировании обязательных требований в тексте следует применять слова «должен», «следует», «необходимо» и производные от них. Каждое требование оформляется в виде отдельного пронумерованного пункта ТЗ.

Величины, определяющие требования и технические характеристики изделия, указываются с допускаемыми отклонениями или оговариваются их максимальные или минимальные значения.

Статистические параметры задаются с указанием уровня вероятности, которому соответствует данное значение параметра.

В ТЗ должны применяться научно-технические термины, обозначения и определения, установленные соответствующими стандартами, а при их отсутствии – общепринятые в научно-технической литературе.

Если в ТЗ принята специфическая терминология, то в конце его должен быть приведён перечень принятых терминов с соответствующими разъяснениями.



Если в ТЗ принята особая система сокращения слов и наименований, то в конце ТЗ приводят перечень принятых сокращений. Небольшое количество сокращений можно расшифровать непосредственно в тексте при первом упоминании, например, нормативно-техническая документация (НТД).

Обозначения и написание единиц физических величин должны соответствовать ГОСТ 8.417-2002 [15].

Ссылки на стандарты (кроме стандартов организаций), технические условия и другие документы допускаются при условии, что они полностью и однозначно определяют соответствующие требования. Ссылаться следует на документ в целом или на его разделы и приложения. Ссылки на подразделы, пункты, таблицы и иллюстрации не допускаются.

К сожалению, несмотря на всю свою важность, содержание ТЗ регламентировано нормативными документами (ГОСТ, ОСТ) всё ещё недостаточно. Поэтому разберём подробнее примерное содержание отдельных пунктов, которые обычно включают в ТЗ.

**1. Назначение РЭС и область применения.** Дается название изделия, его условное обозначение, краткая характеристика назначения и области применения.

**2. Основание для разработки.** Это выданное руководителем задание, на основании которого проводится проектирование: схемы электрические (принципиальная и др.) и описания их работы, перечни элементов к схемам, карта электрических режимов работы ЭРЭ и т.д.).

**3. Показатели назначения.** Перечисляются основные параметры РЭС, которые влияют на конструкцию устройства (характеристики входных и выходных сигналов, диапазон рабочих частот, выходная мощность, параметры электропитания, потребляемая мощность или энергия, рабочие напряжения и токи в цепях устройства, точность измерения и т. д.) и, при необходимости, параметры подключаемых устройств.

**4. Сведения о мировом уровне проектируемого РЭС.** С целью определения новизны, конкурентоспособности и патентоспособности проектируемого РЭС приводятся основные технические показатели, стоимость и т.п. характеристики у аналогичных изделий, выпускаемых ведущими отечественными и зарубежными фирмами, найденные в результате поиска в Интернете, а также изучения научно-технической литературы.

**5. Условия эксплуатации.** Разрабатываемая конструкция должна обеспечить надёжное функционирование РЭС во всех диапазонах планируемых дестабилизирующих факторов (Таблица 1.1) [16,17]. В зависимости от вида и назначения необходимо указать предельные характеристики условий эксплуатации, при которых должно обеспечиваться использование изделия с заданными техническими показателями:

– допустимые воздействия климатических условий (температуры, влажности, атмосферного давления, циклические воздействия инея и росы, радиации, агрессивных сред, пыли и т.п.); для тропических условий эксплуатации дополнительно указывают биологические факторы - влияние плесени, насекомых и грызунов.

– допустимое воздействие механических нагрузок (вибрационных, ударных, скручивающих, ветровых и др.);

– колебания напряжения сети, допустимый перегрев,

– условия транспортирования, хранения, время подготовки изделия к использованию после транспортирования и хранения и т.д.;

– вид обслуживания (постоянное или периодическое) или допустимость работы без обслуживания; периодичность и ориентировочная трудоёмкость технического обслуживания и ремонта.

Таблица 1.1 – Типовые характеристики условий эксплуатации различные видов РЭС

Вид воздействия	Параметры воздействия	Категории РЭС					
		Стационарные РЭС	РЭС на наземном транспорте	РЭС на морских судах	Авиационные РЭС	Космические РЭС	
1. Синусоидальная вибрация	Амплитуда ускорения, мм	2 - 10	2 - 10	2 - 50	10 - 12	2 - 10	
	Диапазон частот, Гц	1 - 500	1 - 500	1 - 2000	1 - 2000	1 - 2000	
2. Случайная широкополосная вибрация	Спектральная плотность виброускорения, м/с <sup>2</sup>	-	30 - 50	-		5 - 50	
	Диапазон частот, Гц	-	1 - 500	-	1 - 2000	1 - 2000	
3. Акустический шум	Диапазон частот, Гц	50 - 10000	50 - 10000	50 - 10000	50 - 10000	50 - 10000	
	Уровень звукового давления, дБ	130	до 170	до 150	до 150	170	
4. Механический удар одиночного действия	Пиковое ускорение, м/с <sup>2</sup>	75 - 3000	75 - 3000	150	до 20	до 150	
	Длительность ударного ускорения, мс	0,2 - 15	-	0,5 - 2,0	0,5 - 15	1 - 6	
5. Механический удар многократного действия	Пиковое ускорение, м/с <sup>2</sup>	10	10	6 - 15	до 15	до 40	
	Длительность ударного ускорения, мс	1 - 15	1 - 15	5 - 20	до 15	2 - 15	
6. Сейсмический удар взрыва	Ускорение, м/с <sup>2</sup>	20	120	-	75	-	
	Длительность ударного ускорения, мс	50	0,01	-	-	-	
7. Линейное ускорение	Значение ускорения, м/с <sup>2</sup>	-	-	до 5	до 15	до 20	
8. Атмосферное пониженное давление	При эксплуатации, кПа	60	-	-	0.66	0.66	
	При авиатранспортировании, кПа	12	12	12	-	-	
9. Изменение атмосферного давления	Диапазон изменения, кПа	-	-	-	75 - 40	-	
10. Температура окружающей среды	пониженная	рабочая, °С	-50	-50	до -40	до -60	-50
		предельная, °С	-65	-65	до -50	до -65	-65
	повышенная	рабочая, °С	50	50 - 125	35 - 100	до 70	60
		предельная, °С	60	60 - 125	70 - 120	-	85
11. Влажность	Пониженная, %	20	20	-	20	20	
	Повышенная, %	100	100	100	100	100	
	Амплитуда качки,	-	-	30 - 45	-	-	

Вид воздействия	Параметры воздействия	Категории РЭС				
		Стационарные РЭС	РЭС на наземном транспорте	РЭС на морских судах	Авиационные РЭС	Космические РЭС
12. Качка	<i>град.</i>					
	Период, с	-	-	7 - 16	-	-
13. Гидростатическое давление	<i>кгс/см<sup>2</sup></i>	-	-	от 12 - 16	-	-
14. Солнечное излучение	Интегральная плотность потока, <i>Вт/м<sup>2</sup></i>	1120	1120	1120	-	-
	Плотность ультрафиолетового излучения, <i>Вт/м<sup>2</sup></i>	68	68	68	-	-
15. Воздушный поток	Среднее значение скорости, <i>м/с</i>	-	30	70	-	-
16. Агрессивные среды	Сернистый газ, <i>мг/м<sup>3</sup></i>	2,0	2,0	2,0	2,0	-
	Сероводород, <i>мг/м<sup>3</sup></i>	1,0	1,0	1,0	1,0	-
	Аммиак, <i>мг/м<sup>3</sup></i>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Двуокись азота, <i>мг/м<sup>3</sup></i>	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	Озон, <i>мг/м<sup>3</sup></i>	0,1	0,1	-	0,1	-

#### 6. Технические характеристики:

- состав изделия (наименование, количество и назначение составных частей изделия, поставляемых потребителю, но не соединяемых на заводе-изготовителе);
- требования к конструкции (уровень, пользователя, количество органов управления, настройки, контроля, внешних соединителей);
- показатели качества (масса, габариты, стоимость и т.п.);
- особенности конструктивного исполнения (форма конструкции), установочные и присоединительные размеры;
- технологические ограничения (учёт особенностей конкретного производства, требования по элементной базе, материалам);
- требования к ремонтпригодности и доступности при регулировке и замене деталей;
- возможные способы обеспечения защиты от внешних воздействий (механических, климатических и других) несущей конструкцией (амортизация, полная или частичная герметизация, влагозащита, защита от брызг и т.д.);
- требования к помехозащищённости, электрической прочности и к электрическому сопротивлению изоляции;
- требования к надёжности и меры по её повышению [17,18,19] знакомит с ориентировочным средним временем наработки на отказ  $T_o$ . Кроме этого, в ТЗ могут быть заданы вероятность безотказной работы  $p(t)$  в пределах заданной наработки на отказ  $T_o$ , средний срок службы  $T_c$  и среднее время восстановления  $T_b$ . Эти параметры зависят от вида и назначения РЭС, общего количества электрорадиоэлементов (ЭРЭ), способов их резервирования и режимов работы, количества интегральных микросхем (ИМС), типов и количества различных конструктивных крепёжных элементов;

- требования к технологичности, уровню унификации и стандартизации, определяемые серийностью выпуска изделий;
- требования по охране окружающей среды, безопасности эксплуатации и требования по охране труда;
- меры по обеспечению удобства расположения органов управления, другие эстетические и эргономические требования (варианты цветовых решений, расстояние от пользователя до устройства и т.д.);
- требования к маркировке и упаковке;
- порядок испытаний и приёмки РЭС.

Таблица 1.2 – Рекомендуемое ориентировочное среднее время наработки на отказ для различных групп РЭС

Группа РЭС по ГОСТ 16019	Количество ЭРЭ в изделии (включая ИМС), шт.	Средняя наработка на отказ $T_0$ , ч, при содержании ИМС к общему числу ЭРЭ		
		$\leq 5\%$	$> 5\%$	$> 95\%$
<b>С1, С2</b>	$\leq 10$	20000	30000	40000
	11 .. 20	10000	18000	23000
	21 .. 30	7500	12000	16000
	31 .. 50	5000	9000	13500
	51 .. 70	4000	7500	9500
	71 .. 100	3500	5500	8000
	101 .. 200	3500	5500	8000
	201 .. 1000	2500	3500	5000
	1001 .. 2000	2000	3000	4500
	2001 .. 3000	1500	2500	4000
	3001 .. 4000	1000	2000	3500
	$> 4000$	700	1500	3000
<b>В3 - В5</b>	$\leq 700$	2000	3000	5000
	701 .. 1000	1500	2500	4500
	1001 .. 2000	1000	2300	4000
	2001 .. 3000	700	2000	3500
	$> 3000$	500	1400	3000
<b>Н6, Н7</b>	$\leq 200$	3000	4000	6000
	201 .. 300	2500	3500	5500
	301 .. 700	2000	3000	5000
	701 .. 1000	1500	2500	4500
	$> 1000$	1000	2000	4000

**7. Экономические требования** (для каких потребителей предназначено разрабатываемое РЭС, его новизна и конкурентоспособность, затраты на разработку, производство и эксплуатацию и т.д.).

**8. Требования к разработке** (стадии и этапы, комплектность документации и порядок её контроля, приёмки и т.д.).

## 2 Разработка технических предложений

### 2.1 Анализ технического задания и выбор вариантов конструктивно-технологических решений

Прежде чем приступить к конструкторской разработке РЭС, необходимо провести тщательный анализ ТЗ с целью определения возможных вариантов решения поставленной задачи. В ходе расширенного анализа выявляются принципы работы проектируемого РЭС, схемотехнические, конструктивные, эксплуатационные, технологические и другие требования и ограничения. Это позволяет компетентно выбрать способы защиты от дестабилизирующих факторов, вариант исполнения электрического монтажа, элементную базу, необходимые материалы, покрытия и т.п.

#### 2.1.1 Анализ назначения и условий эксплуатации РЭС

Назначение аппаратуры РЭС и условия эксплуатации оказывают определяющее влияние на конструктивно-технологические решения при проектировании РЭС и однозначно определяют требования к устойчивости, проектируемой РЭС к определённым диапазонам перепадов температур, атмосферного давления, к вибрациям, ударам и т.д. Создаваемая конструкция должна обеспечивать защиту РЭС при эксплуатации от воздействий внешней среды: климатических, механических воздействий, помех и т.п. Если не учитывать воздействие эксплуатационных факторов, то создать надёжное РЭС не удастся.

В большинстве случаев РЭС так или иначе решают задачи некоторого преобразования информации (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Наиболее распространенные задачи, решаемые с помощью РЭС

Задача	Назначение
<b>Передача информации на расстояние</b>	Связь, телевизионное вещание, радиовещание, телеметрия, построение различных сетей
<b>Обработка информации</b>	Цифровые и аналоговые средства обработки информации
<b>Запись и воспроизведение информации</b>	Бытовые средства записи/воспроизведения аудио- или видеоинформации, цифровая фотография, средства объективного контроля
<b>Системы управления</b>	АСУ, радиоэлектронная автоматика, телемеханика, дистанционное управление
<b>Извлечение информации</b>	Навигация, локация, измерительная техника, дефектоскопия, научные исследования, медицинская техника, криминалистика
<b>Преобразование сигналов</b>	Усилители, аттенюаторы, преобразователи (в том числе датчики), модуляторы, демодуляторы
<b>Генерация сигналов с заданными характеристиками</b>	Измерительная техника, музыкальная аппаратура, медицинская техника, научные исследования

Очевидно, что подходы к проектированию профессиональных и бытовых, гражданских и военных РЭС не должны быть одинаковыми. Поэтому при анализе назначения и

условий эксплуатации РЭС вначале следует установить тип аппаратуры: бытовая или специальная.

Заметим, что характер и интенсивность воздействия климатических, механических, радиационных и других факторов на РЭС существенно зависят от места их размещения (наземные, надводные, воздушные, космические, подводные, подземные и комбинированные РЭС), способа эксплуатации: носимые (портативные), переносные (лабораторные, бытовые и т. д.), РЭС устанавливаемые на мобильных и стационарных объектах [49,55].



Для **стационарных РЭС** характерна работа в помещении с нормальными климатическими условиями при отсутствии в процессе эксплуатации механических воздействий. Тем не менее при транспортировке в нерабочем состоянии на такие РЭС действует вибрация, удары, тряска и линейные перегрузки.



При разработке конструкций **измерительных РЭС** важнейшим показателем качества конструкции является обеспечение стабильности и разрешающей способности измерений от дестабилизирующих факторов.



Основными требованиями к **бытовым РЭС** являются повышенная технологичность конструкции, обеспечивающая малую стоимость, небольшие массы и габариты, простота эксплуатации, повышенные меры безопасности.

При разработке бытовых РЭС очень важно гармоничное внешнее оформление конструкции, на что решающее влияние оказывают вкусы современных потребителей в области технической эстетики, дизайна, знание технологических художественных возможностей производства, социальных проблем и т.п.



Для **носимых РЭС** наиболее острыми являются требования минимальной массы и габаритов. Важнейшими требованиями к таким РЭС являются также устойчивость к случайным значительным ударам, изменению температуры, к конденсации росы, воздействию инея, дождя, пыли.

Особенностью носимых РЭС является значительная зависимость конструкции от габаритов и массы автономных источников питания.



К группе **возимых** относятся РЭС, установленные на всех транспортных средствах, специальных автомобилях и военной технике, перемещающихся по поверхности Земли на колёсном, либо на гусеничном ходу, включая бронетехнику, передвижные пусковые установки и т.п.



Для возимых РЭС характерна работа в условиях вибраций, ударов, пыли, избыточной влажности. Они должны иметь ограниченные габариты и массу, обеспечивать простоту и надёжность электрических соединений, устойчивость к ударам и вибрациям, к возникновению инея и росы, а также ограниченную мощность потребления.



В конструкциях, транспортируемых РЭС нужно обязательно учитывать габариты и форму помещения (кузова, отсека) объекта установки РЭС, а также действенность системы виброизоляции.



Для **морских РЭС** характерна огромная влажность при повышенной температуре и солевом тумане, непрерывная вибрация от двигателей, ударные перегрузки и линейных ускорения (стрельба, шторм и т.п.), акустические, магнитные и радиационные воздействия.



Морские РЭС должны разрабатываться в тропическом исполнении, предусматривать коррозионную и плеснеустойчивость, водо- и брызгозащищённость, защищённость от высокочастотных и низкочастотных электромагнитных полей.

Особенностями **бортовых (самолётных, вертолётных, космических и ракетных) РЭС** являются постоянный рост функциональной сложности, минимизация габаритов и массы, работа в условиях разряженной атмосферы, радиации, высокая надёжность.



При разработке конструкции бортовых РЭС специального назначения широко используют унифицированные типовые конструкции и конструкторские решения, определённые отраслевыми стандартами.

Бортовые РЭС испытывают значительные вибрационные, ударные и линейные перегрузки, а при расположении вне гермоотсеков - воздействие перепадов температур и давлений, тепловых ударов.



Тщательная предполётная проверка вызывает необходимость обеспечения высокой контролепригодности и ремонтпригодности конструкции РЭС.

Кроме перечисленных выше общих требований к бортовым РЭС, к космическим и ракетным РЭС дополнительно предъявляются особо жёсткие требования по массе и габаритам, радиационной защите и защите от космических излучений, защите от совместного действия вибрационных и линейных перегрузок во время старта, электромагнитной совместимости различных РЭС в ограниченном объёме, чрезвычайно высокой надёжности, высокой ремонтпригодности в предстартовый период, учёта специфики больших высот и невесомости.

Особые требования предъявляют к взрывозащищенным РЭС, эксплуатируемым во взрывоопасной среде. Взрывоопасная среда может образоваться из смеси некоторых газообразных веществ, а также при высокой концентрации горючих веществ в воздухе в виде



пыли (угольная пыль в шахтах и на обогатительных фабриках, мучная и сахарная пыль на соответствующих предприятиях и т.д.). Общие требования на взрывозащищённое электрооборудование установлены ГОСТ Р 51330.0-99 (МЭК 60079-0-98). В ТЗ на разработку РЭС в обязательно должно быть включено требование о взрывозащищённом исполнении. Конструктор обязан исключить любую возможность инициирования взрыва среды разрабатываемым РЭС применением специальных схемотехнических и конструктивных решений (герметизация конструкции корпуса, электрических соединений и устройств заделки кабелей). РЭС во взрывобезопасном исполнении должны проходить обязательные испытания на взрывобезопасность в соответствии с действующими стандартами.

Многие виды РЭС имеют большое количество органов управления и индикации, и поэтому при разработке их конструкции следует обязательно учитывать требования эргономики [20].



При создании РЭС высокой сложности в виде единой сборочной единицы, массогабаритные показатели составляющих его элементов должны быть не более предельно допустимых с точки зрения физических возможностей человека (не более 150 .. 200 кг).

Характерным примером ограничений размеров РЭС как объекта установки является, например, требование обеспечения транспортировки корабельных РЭС через люки (600 x 600 мм).

### 2.1.2 Анализ схемотехнических требований и ограничений

На конструкцию РЭС громадное влияние оказывают назначение и режимы функционирования электрорадиоэлементов электрических схем.

Анализ электрических схем и карт электрических режимов работы ЭРЭ, выполненных с помощью схемотехнических САПР [21] позволяет найти решение следующих задач.

**1. Выделить функциональные узлы и устройства**, которым в последующем можно придать конструктивную обособленность.

**2. Обнаружить компоненты, определяющие особенности компоновки:**

– **Массивные и крупногабаритные ЭРЭ** (силовые трансформаторы, дроссели и т.п.) в зависимости от условий эксплуатации могут потребовать дополнительные крепления или фиксацию, чтобы надёжность РЭС от влияния механических воздействий существенно не снизилась. Если масса ЭРЭ более 70 г. или его габариты слишком велики, размещать такой ЭРЭ на печатной плате нецелесообразно. В любом случае обязателен анализ последствий и специальное обоснование дополнительных креплений.



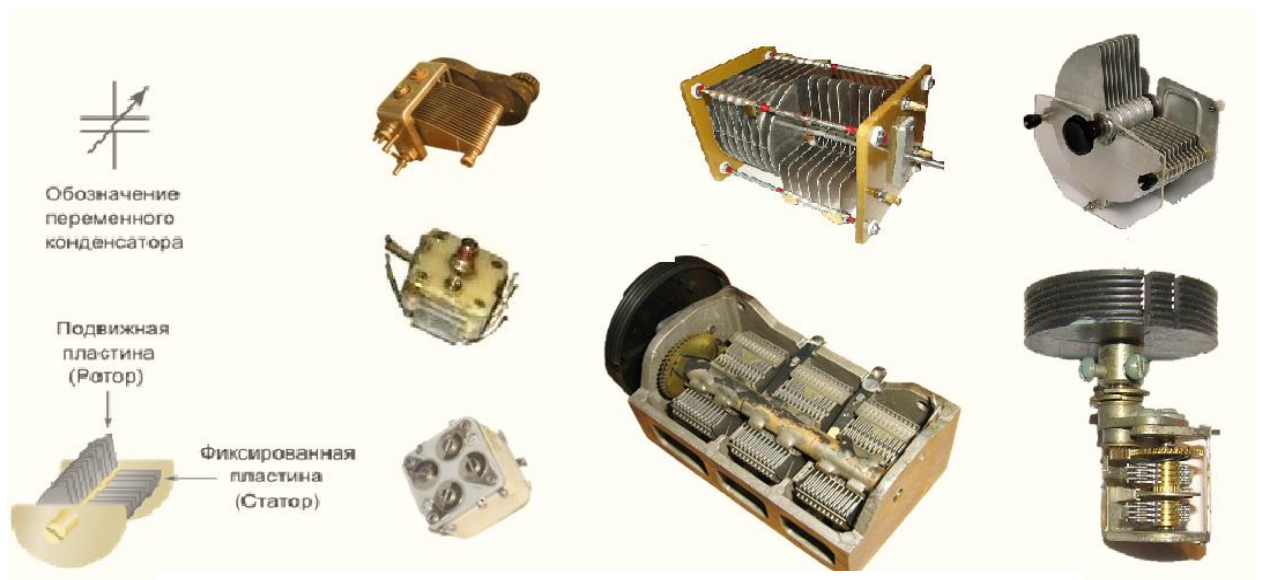


Рис. 2.3 - Конденсаторы переменной ёмкости

Часто подобные элементы на печатной плате не размещают, а выносят на лицевую или заднюю панель корпуса РЭС. Туда же обычно выносят элементы включения-выключения питания, входные и выходные гнезда, элементы индикации, регистрирующие приборы и другие элементы, которые нецелесообразно размещать на печатной плате.

Заметим, что для таких ЭРЭ сразу же надлежит выбрать и оптимальный способ их подсоединения - с помощью разъёма или без него (например, с помощью жгута, припаиваемого к монтажным стойкам или клеммам печатной платы).

– **Подборные ЭРЭ и ЭРЭ с небольшой надёжностью (требующие многократной перепайки при настройке и ремонте), а также подстроечные ЭРЭ** (регулировочные элементы, параметры которых изменяют относительно редко - при настройке, проверке).

Это подстроечные резисторы (Рис. 2.4), конденсаторы (Рис. 2.5) и катушки индуктивности (Рис. 2.6), для регулировки параметров которых употребляют отвёртки, ключи и т.п.



Рис. 2.4 - Подстроечные резисторы



Рис. 2.5 - Подстроечные конденсаторы

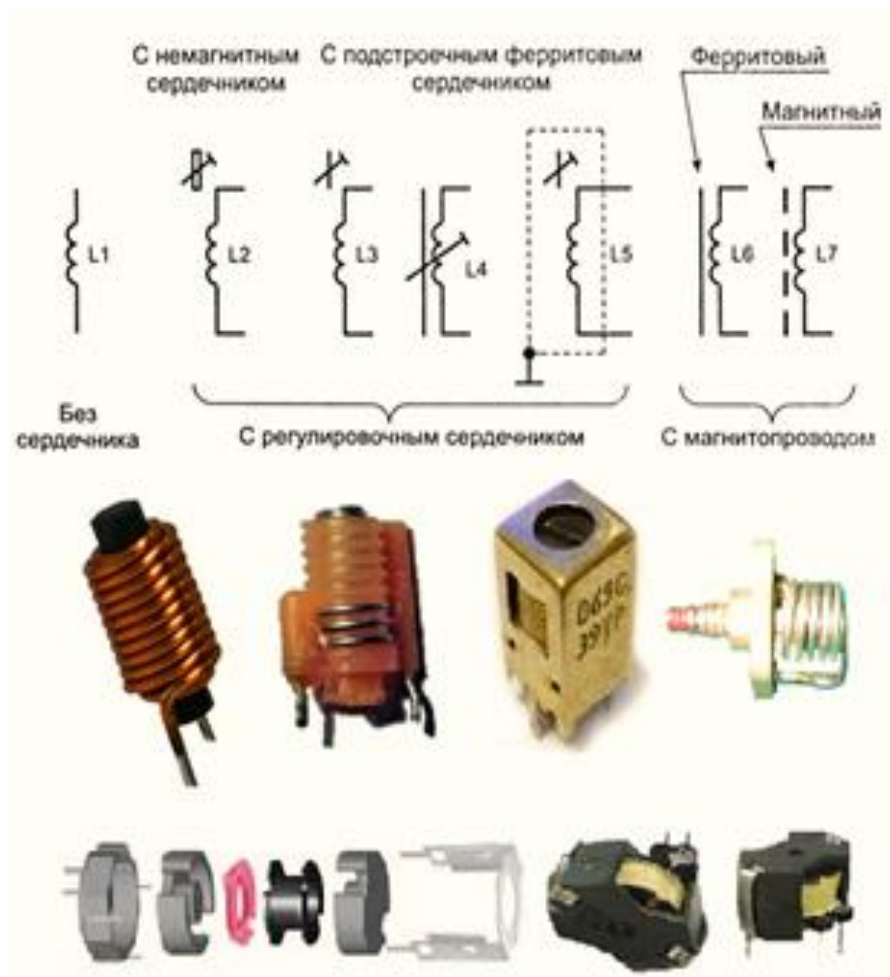


Рис. 2.6 - Катушки индуктивности с подстроечными сердечниками

**3. Проанализировать функциональное назначение различных электрических цепей.** Выявить группы цепей, к выполнению которых предъявляются особые требования и сформулировать требования к их проектированию.

Разделение электрических цепей на родственные группы особенно важно для обеспечения электромагнитной совместимости высокочастотных РЭС, при проектировании многослойных ПП, а также аппаратуры с малым уровнем входных токов.

Разумно выделить группы цепей со следующими характеристиками:

– **Цепи с переменными, пульсирующими или импульсными токами.** Особенно важно это для цепей с электролитическими<sup>2</sup> конденсаторами (Рис. 2.7), так как при работе в цепях как с пульсирующим, так и с постоянным напряжением на их обкладках должно поддерживаться соответствующее полярности выводов не изменяющее знака допустимое напряжение. Высокие токи утечки, большое эквивалентное последовательное сопротивление и индуктивность ограничивают возможность использования их на высоких частотах, и потому в преобразовательной силовой технике их приходится шунтировать неполярными конденсаторами.



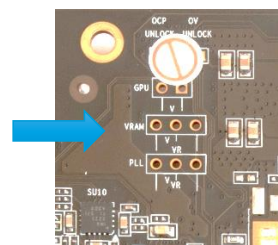
Рис. 2.7 – Конденсаторы с оксидным диэлектриком

– **Цепи силовые потенциальные (питания и земли) - от источников питания - и цепи нагрузки.** Обычно такие цепи характеризуются прохождением значительных токов и поперечное сечение проводника (его ширина на ПП) уточняется расчётом.

– **Слаботочные сигнальные и управляющие цепи** с аналоговыми и импульсными сигналами – ширина проводников может быть минимальной и определяется классом точности изготовления печатной платы.

<sup>2</sup> **Электролитические конденсаторы (конденсаторы с оксидными диэлектриками)** недорогие, характеризуются огромным отношением ёмкости к объёму. Имеют низкую температурную стабильность и значительные отклонения параметров от номинала при её изменении. Включение конденсатора на обратное к рабочей полярности напряжение, превышении допустимых параметров и/или перегреве, приводит к увеличению тока утечки между обкладками, резкому ухудшению качества, и при достаточной мощности цепи конденсатор может даже взорваться.

– Цепи, используемые для проведения внутрисхемного контроля электрических параметров и требующие введения в топологию проводящего рисунка контрольных контактных площадок для подключения измерительных приборов.



– **Высокочастотные цепи**, проектирование которых требует учёта **электромагнитной совместимости**<sup>3</sup>.

В принципе помехи могут приходиться от источника помех к приёмнику через электрические, магнитные и электромагнитное поля. Определённые проводники могут играть роль как приёмной, так и передающей антенны. Поэтому для таких цепей важны малые паразитные параметры (ёмкости и индуктивности) и малая задержка сигналов, что достигается уменьшением длины проводников.

При разработке конструкций РЭС, работающих на высоких и сверхвысоких частотах, необходимо учитывать конструкторские и технологические факторы, от которых зависят электромагнитная совместимость<sup>4</sup>, потери, добротность и нестабильность волнового сопротивления микрополосковых линий и т.п. Особое внимание должно быть уделено экранированию проводов и кабелей, а также обеспечению электрогерметичности волноводов и экранов.

Для обеспечения электромагнитной совместимости устройств также необходимо ослабить связи между источниками помех и приёмниками помех до допустимых значений, что достигается их пространственным разнесением.

**Цепи и ЭРЭ с большой амплитудой высокочастотных сигналов** для снижения уровня помех возможно потребуют **экранирования**<sup>5</sup>.

Помехи нередко распространяются через общие цепи, например, цепи питания. В таких случаях помогает установка помехоподавляющих фильтров в общие цепи источников и приёмников помех.

**Цепи с высоким напряжением** характеризуются повышенной вероятностью пробоя между печатными проводниками, что вынуждает увеличивать зазоры между ними.

В результате выполненного анализа должны быть сформирована схема электрическая принципиальная печатного узла, состоящей только из тех ЭРЭ, которые следует разместить на печатной плате функционального узла.

<sup>3</sup> **Электромагнитная совместимость (ЭМС)** — способность РЭС одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных электромагнитных помех и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим РЭС.

<sup>4</sup> **Электромагнитная совместимость (ЭМС) РЭС** — способность РЭС одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных электромагнитных помех и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим РЭС.

<sup>5</sup> **Экранирование** — локализация электромагнитной энергии в определённом пространстве за счёт ограничения распространения её всеми возможными способами.

### 2.1.3 Анализ способов охлаждения

Только несколько процентов энергии, подводимой от источника электропитания, расходуется в РЭС на полезную работу. Остальная часть энергии выделяется в виде тепловой энергии. В большинстве случаев увеличение тепловой нагрузки на РЭС приводит к значительному снижению надёжности работы. Поэтому проблема отвода избыточного тепла является крайне актуальной.

**Тепловой режим** РЭС характеризуется температурным полем - пространственно-временным распределением температуры внутри корпуса аппаратуры. На тепловой режим РЭС влияют как внешнее температурное действие окружающей среды, так и тепло, выделяемое радиоэлементами самого РЭС.

В зависимости от стабильности во времени тепловой режим может быть либо *стационарным*, либо *нестационарным*. **Стационарный режим** характеризуется неизменным во времени температурным полем. Такой режим наблюдается в тех случаях, когда собственная теплоёмкость РЭС соизмерима с количеством теплоты, выделяемой при работе. У **нестационарного режима** температурное поле изменяется от времени (например, при включении РЭС, при одиночных и кратковременно повторяющихся тепловых нагрузках).

Тепловой режим ЭРЭ является одним из важнейших факторов, ограничивающих уменьшение габаритов РЭС. Размещение большого числа ЭРЭ на небольшой площади приводит к интенсивному нагреву РЭС, что требует отвода тепла (охлаждения). Чем меньше габариты РЭС и выше требования к его производительности и надёжности, тем актуальнее для него проблема эффективного охлаждения.

Перенос тепловой энергии из от нагретой части РЭС в холодную или в окружающую среду называется *теплообменом*. Чем больше разность температур между отдельными частями РЭС и окружающей средой, тем теплообмен происходит интенсивнее.

Для характеристики процесса распространения теплоты вводят понятие *тепловой поток*  $P$  [Вт]. Это количество теплоты  $Q$  [Дж], проходящей за время  $\tau$  [с] через некоторую поверхность в направлении нормали к ней:

$$P = \frac{Q}{\tau}. \quad (2.1)$$

Если количество переданной теплоты  $Q$  отнести к площади поверхности  $S$  [м<sup>2</sup>] и времени  $\tau$ , то получим  $g$  [Вт/м<sup>2</sup>] - плотность теплового потока (удельный тепловой поток):

$$g = \frac{Q}{S \cdot \tau} = \frac{P}{S}. \quad (2.2)$$

Теплообмен может происходить за счёт *теплопроводности*, *конвекции* и *теплого излучения* [22,24,25].

**Конвекция** - перенос теплоты в жидкостях, газах или сыпучих средах потоками вещества. При *естественной конвекции* нижние слои вещества нагреваются, расширяются, их плотность уменьшается, они становятся легче и начинают всплывать (под действием выталкивающей силы Архимеда). Верхние слои, напротив, остывают, становятся тяжелее и опускаются вниз, после чего процесс повторяется снова и снова. Возникающие локальные течения эффективно уносят тепло из нагретой зоны.

Для увеличения интенсивности теплоотвода с помощью конвекции корпуса РЭС либо перфорируют, либо с помощью рёбер увеличивают площадь охлаждения (Рис. 2.8). Введение вентиляционных отверстий при их разумном расположении снижает перегревы внутри блока РЭС примерно на 20% [26].



Рис. 2.8 - Виды корпусов РЭС с интенсивным тепловыделением:  
а) - с перфорацией стенок; б) - с оребрением стенок

Теплоотдача конвекцией определяется законом Ньютона:

$$\Delta P_k = \alpha_k \cdot S_k \cdot \Delta \tau = \frac{\Delta \tau}{R_{Tk}}, \quad (2.3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопередачи конвекцией;

$R_{Tk}$  - тепловое сопротивление конвекции, °С/Вт.

$S_k$  - площадь тепловыделяющей поверхности, см<sup>2</sup>.

Если естественная конвекция недостаточно эффективна, то применяют *вынужденную* (принудительную) *конвекцию*, когда перемещение вещества обусловлено действием лопастей вентиляторов, насосов и т.п.

**Кондукция (теплопроводность)** требует непосредственного физического контакта между соприкасающимися телами и *не сопровождается переносом вещества*. Перенос энергии от более нагретых элементов, узлов и блоков РЭС к менее нагретым происходит за счёт теплового движения и взаимодействия составляющих его структурных частиц - молекул, атомов, свободных электронов. Кондукция приводит к выравниванию температуры тела. Передача тепла через однородный в тепловом отношении слой материала характеризуется уравнением Фурье в интегральной форме (и в дифференциальной форме, если слой неоднородный):

$$\Delta P = \frac{S_T \cdot \Delta \tau}{\rho_T \cdot \delta} = \frac{\Delta \tau}{R_T}, \quad (2.4)$$

где  $\rho_T$  - удельное тепловое сопротивление материала, °С·см/Вт;

$\Delta \tau$  - перепад температур в слое, °С;

$\delta$  - толщина слоя, см;

$S_T$  - площадь поверхности слоя, см<sup>2</sup>;

$\Delta P$  - передаваемая мощность, Вт;

$R_T$  - тепловое сопротивление слоя, °С/Вт.



**Тепловое излучение** (излучения тепла, лучеиспускание) происходит за счёт превращения тепловой энергии в энергию излучения (лучистая энергия) и не сопровождается переносом вещества. Теплоотдача с поверхности нагретого тела в окружающее пространство излучением зависит от температуры тела и окружающей среды, а также от свойств поверхности (от степени черноты и шероховатости поверхности). Количество тепла (Вт), переданного излучением, определяется законом Стефана-Больцмана:

$$\Delta P_{\text{л}} = \alpha_{\text{л}} \cdot S_{\text{л}} \cdot \Delta \tau = \frac{\Delta \tau}{R_{\text{T}}} \quad (2.5)$$

где:  $\alpha_{\text{л}}$  - коэффициент излучения;

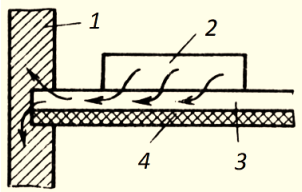
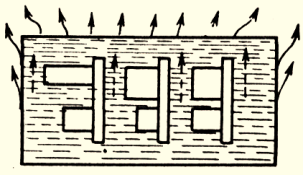
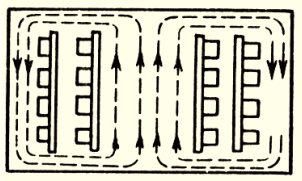
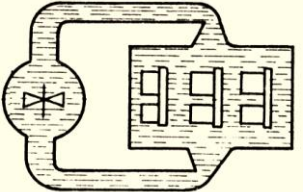
$S_{\text{л}}$  - поверхность излучения, см<sup>2</sup>.

При нормальных климатических условиях и естественном охлаждении в конструкциях РЭС примерно 70% тепла отводится за счёт конвекции, приблизительно 20% - за счёт излучения и около 10% - за счёт теплопроводности [22]. Другими словами, основную роль в обеспечении теплового режима РЭС в большинстве случаев играет теплообмен с помощью конвекции. Заметим, что с увеличением высоты использования РЭС над поверхностью Земли (горы, самолёты и космические аппараты) плотность и давление воздуха резко уменьшаются и конвективный теплообмен перестаёт работать. При этом охлаждение РЭС становится возможным лишь за счёт теплового излучения.

Способ охлаждения во многом определяет конструкцию РЭС, поэтому систему охлаждения РЭС необходимо выбрать ещё на ранней стадии проектирования. Следует предусмотреть и принять такие конструктивные решения, чтобы в разрабатываемой конструкции максимальные температуры всех элементов не превысили допустимых значений. Неудачное решение этой задачи может обнаружиться только на поздних этапах проектирования и привести к неоправданным экономическим затратам на повторное проектирование.

Таблица 2.2 представляет возможные способы охлаждения РЭС

Таблица 2.2 - Способы охлаждения РЭС

№	Способ охлаждения	№	Способ охлаждения
1	1 - стенка РЭС; 2 - ЭРЭ; 3 - теплоотвод; 4 - печатная плата	6	Естественное жидкостное
	<b>Кондукция (теплопроводность)</b> 		<b>Конвекция</b> 
2	Естественное воздушное в герметизированном корпусе	7	Принудительное жидкостное
	<b>Конвекция</b> 		<b>Конвекция</b> 

Системы охлаждения можно также классифицировать по коэффициенту теплоотдачи  $K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С) (Таблица 2.3).

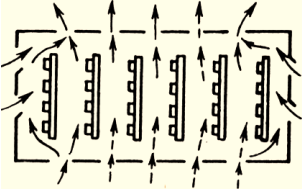
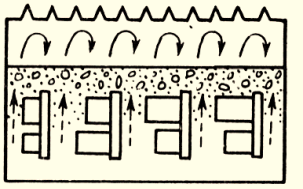
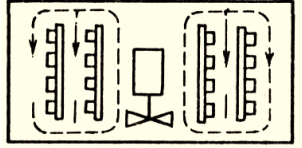
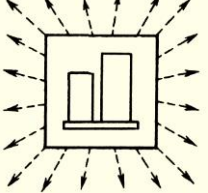
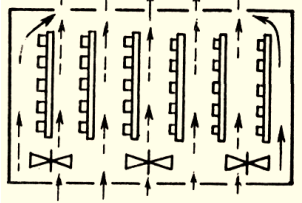
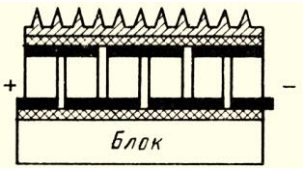
3	Естественное в негерметизированном корпусе	<p><b>Конвекция</b></p> 	8	Охлаждение за счёт изменения агрегатного состояния теплоносителя.	<p><b>Испарительное</b></p> 
4	Принудительное воздушное в герметизированном корпусе	<p><b>Конвекция</b></p> 	9		<p><b>Излучение</b></p> 
5	Принудительное воздушное в негерметизированном корпусе	<p><b>Конвекция</b></p> 	10	Поглощение или выделение тепла при прохождении тока в месте сая двух разнородных проводников	<p><b>Эффект Пельтье</b></p> 

Таблица 2.3 - Коэффициенты теплоотдачи K для различных систем охлаждения

Система охлаждения	Коэффициент теплоотдачи K, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)
Естественная воздушная конвекция и излучение	2 - 10
Принудительная конвекция в воздухе и парах	10 - 100
Естественная конвекция в масле и других жидкостях той же плотности	200 - 300
Принудительная конвекция в масле и других жидкостях той же плотности	300 - 1000
Естественная конвекция в воде	200 - 600
Кипение воды	500 - 45000
Капельная конденсация водяных паров	40000 - 120000

В реальных РЭС все перечисленные выше способы переноса тепла могут работать одновременно в различных сочетаниях, и тепловой режим РЭС определяется их суммарным действием. Тот или иной вид теплоотвода приобретает преобладающее значение в зависимости от назначения и конструкции РЭС.

Комплекс конструктивных решений, направленных на снижение температуры радиоэлементов, требует значительных материальных затрат. Для предварительного выбора

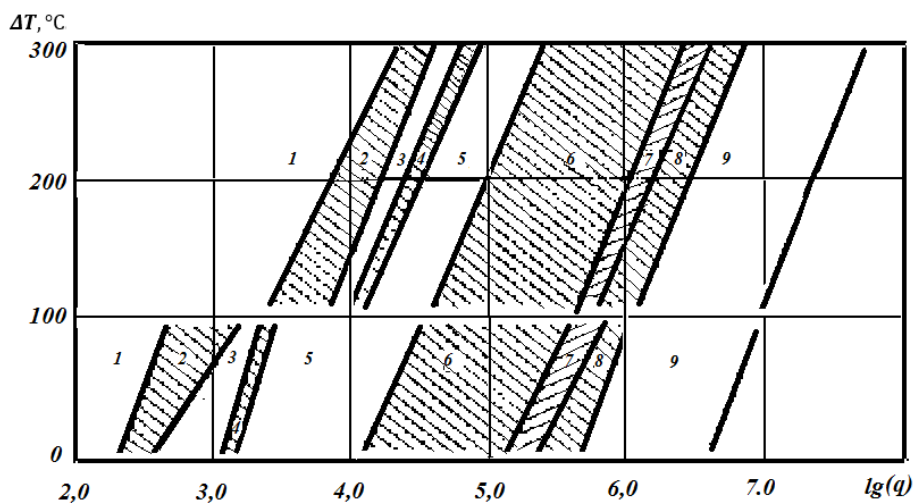


Рис. 2.9 – Области рационального применения различных способов охлаждения РЭС:

- возможно применение единственного способа: 1 - свободное воздушное, 3 - принудительное воздушное, 5 - принудительное испарительное;
- возможно применение нескольких способов охлаждения: 2 - свободное и принудительное воздушное, 4 - принудительное воздушное и жидкостное, 6 - принудительное жидкостное и свободное испарительное, 7 - принудительное жидкостное, принудительное и свободное испарительное, 8 - свободное принудительное и свободное испарительное, 9 - свободное и принудительное испарительное

способа охлаждения РЭС можно воспользоваться статистическими графиками, характеризующими области рационального применения различных способов охлаждения (Рис. 2.9).

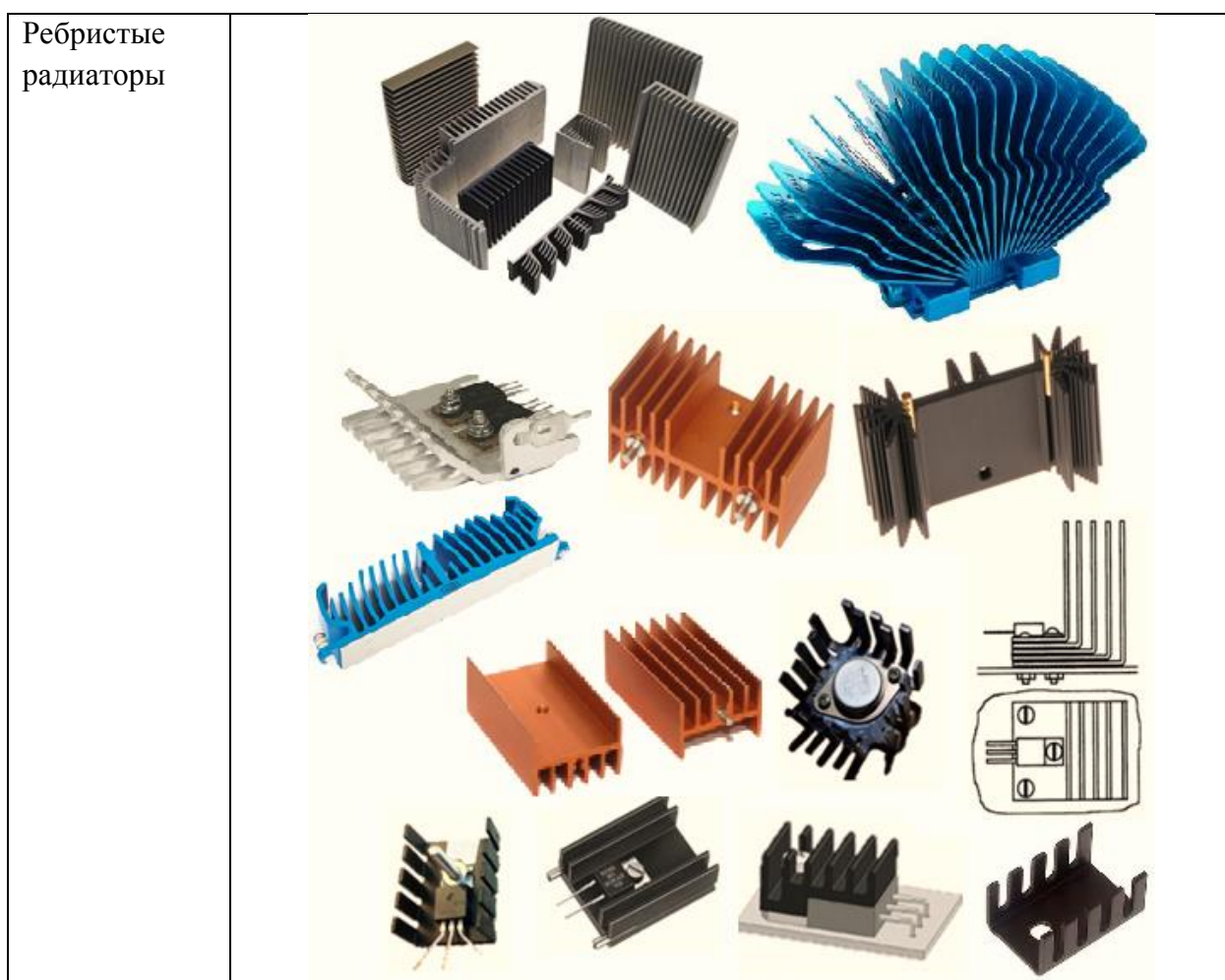
Заметим, что верхние кривые на Рис. 2.9, соответствуют  $\Delta T > 100$  °С, и применяются обыкновенно для выбора способа охлаждения больших элементов (крупногабаритные лампы, магниты, дроссели и т.п.), так как при охлаждении разветвлённых поверхностей больших элементов можно получить более высокие эффективные коэффициенты теплоотдачи. Нижние кривые на Рис. 2.9 не являются продолжением соответствующих кривых в верхней части. Они применяются для выбора способа охлаждения блоков, стоек и т.п., выполненных на небольших ЭРЭ, так как для них, как правило,  $\Delta T < 100$  °С.

При естественном воздушном охлаждении выделяющаяся в РЭС тепло конвекцией, теплопроводностью и излучением передаётся его корпусу и таким же путём рассеивается в окружающую среду. Метод естественного воздушного охлаждения не требует дополнительных затрат энергии, прост, высоконадёжен, полностью бесшумен и имеет небольшую стоимость. Недостаток — небольшая эффективность охлаждения и громоздкость: на 1 Вт

мощности требуется поверхность охлаждения  $25 - 30 \text{ см}^2$ . Чтобы необоснованно не увеличивать габариты РЭС, этот способ разумно использовать лишь при небольших удельных мощностях рассеивания тепла  $g$  ( $g < 0,2 \text{ Вт/см}^2$ ).

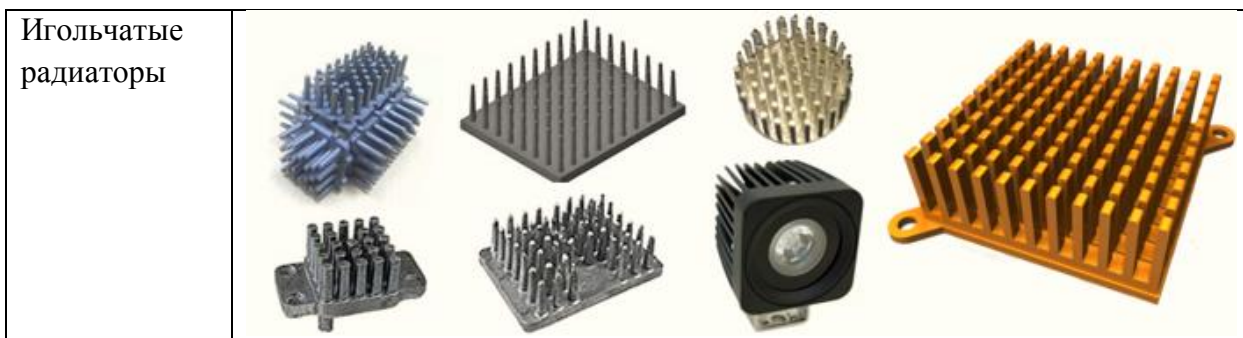
Поверхность полупроводникового кристалла слишком мала, чтобы конвекции было достаточно для его охлаждения. Наиболее распространённый способ увеличения площади охлаждения ЭРЭ — применение пассивных теплоотводов на основе алюминиевых или медных ребристых и игольчатых (штыревых) радиаторов, обладающих высокой теплопроводностью ( $200...400 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ). Они могут различаться формой, конструкцией, размером (Таблица 2.4). При закреплении корпуса ЭРЭ на радиаторе площадь поверхности охлаждения многократно увеличивается и, следовательно, тепловое сопротивление радиатор-среда уменьшается. От корпуса ЭРЭ к металлическому радиатору тепло передаётся за счёт теплопроводности, а от радиатора теплоотдача осуществляется уже конвективным и лучистым теплообменом.

Таблица 2.4 - Конструкции радиаторов охлаждения ЭРЭ



Для естественной конвекции лучшей считается игольчатая конструкция, позволяющая увеличить эффективность охлаждения иногда на 100% при одинаковых размерах с ребристыми. Круглые штыри позволяют отводить тепловой поток во всех направлениях.

Даже между хорошо обработанными поверхностями есть воздушные зазоры. Так как воздух очень плохо проводит тепло, то передача тепла между поверхностями ЭРЭ и



радиатора затруднена. Для уменьшения теплового сопротивления между соприкасающимися достаточно шероховатыми поверхностями радиатора и ЭРЭ используется теплопроводная паста (термопаста) — многокомпонентное пластичное вещество с высокой теплопроводностью. Воздух, находящийся между поверхностями, заменяется на теплопроводящую пасту со значительно более высокой теплопроводностью, что обеспечивает улучшенный тепловой контакт.

Перспективным направлением является замена термопаст на резиноподобные термоэластичные полимеры с высокой теплопроводностью [27], из которых изготавливаются тонкие пластины (прокладки). Они размещаются взамен традиционных термопаст и снижают тепловое сопротивление системы охлаждения. Прокладки из термопластичных полимеров технологичны, дешевле и долговечнее большинства термопаст. К тому же из них легко могут быть отлиты сложные 3D-изделия, эффективно «выбирающие» воздушные зазоры в трёх измерениях.

Вместо алюминия и меди в системах охлаждения в последнее время предлагается применять в качестве полноценной замены теплорассеивающие пластмассы (полимерные композиты) с теплопроводностью в 5...10 Вт/(м·К) [27]. Многократное повышение теплопроводности стало возможным за счёт использования наполнителей с высокой теплопроводностью (до 200 Вт/(м·К)), подбора специальных технологических добавок, специализированного технологического оборудования для высокого и сверхвысокого наполнения пластмасс. Подобным радиаторам для повышения площади теплоотдачи нетрудно придать сложную форму. Кроме того, у них отсутствует «антенный эффект», характерный для алюминиевых радиаторов. Изделия специальной техники с такими радиаторами имеют гораздо более низкий уровень радиозаметности, и с них существенно затруднён несанкционированный сбор информации.

Заметим, что теплорассеивающие пластмассы могут быть с успехом использованы и для деталей конструкции двоякого назначения: всевозможные корпуса, оболочки, монтажные стойки, переходники и другие детали одновременно являются эффективными теплорассеивающими поверхностями.

Стоимость изделий из теплорассеивающих пластмасс в 2—3 раза ниже, чем аналогичных деталей из алюминия. Они в среднем на 40% легче аналогичных алюминиевых, что позволяет существенно уменьшить вес бортовой аппаратуры. Поверхность подобных изделий, полученных высокоточным литьём под давлением, не шероховатая, а имеет «зеркальное» качество, и они без всякой доработки полностью готовы к сборке.

Сильно теплонегруженные блоки РЭС могут потребовать применения систем принудительного охлаждения - кулеров [24,25]. **Кулер** (англ. *cooler* - охладитель) - название системы воздушного охлаждения, состоящей из вентилятора и радиатора. Конструкция кулеров зависит от плотности теплового потока. (Таблица 2.5).

Таблица 2.5 - Конструкции систем принудительного охлаждения



По характеру работы принудительная вентиляция может осуществляться тремя способами.

При **приточной вентиляции** охлаждённый и очищенный воздух *нагнетается* в корпус РЭС. Для отвода нагретого воздуха из РЭС служат вентиляционные отверстия или жалюзи на его корпусе.

При **вытяжной вентиляции** вентилятор *вытягивает* из РЭС нагретый воздух. Холодный воздух поступает в РЭС через вентиляционные отверстия в дне или боковых стенках корпуса аппарата.

При **приточно-вытяжной вентиляции** нагнетание холодного, и вытяжка нагретого воздуха осуществляются двумя различными вентиляторами.

При использовании приточной вентиляции вентилятор работает в более холодном и, следовательно, более плотном воздухе, поэтому она считается эффективнее вытяжной.

Вентиляционные отверстия для входа воздуха в корпус РЭС обычно снабжаются фильтрами для защиты от пыли.

К достоинствам систем принудительного охлаждения относят сравнительно низкую стоимость, простоту установки и обслуживания. Тем не менее, применение принудительного охлаждения приводит к дополнительному потреблению энергии. Вращающиеся лопасти вентилятора создают большой шум, а сами вентиляторы обладают крайне невысокой надёжностью. Всё это приводит к снижению надёжности работы РЭС в целом.

В последние годы нагрев современных процессоров и видеокарт стал настолько высоким, что часто на одном кулере можно увидеть не один вентилятор, а несколько. При этом существенно увеличиваются габариты и масса системы охлаждения, уровень шума и стоимость. Для улучшения теплоотвода особо теплонегруженных деталей РЭС (мощные выходные каскады передатчиков, силовые полупроводниковые элементы, лазерные диоды и т.д.) (Рис.



Рис. 2.10 - Жидкостная система охлаждения мощных ЭРЭ компании Zalman

2.10) всё чаще применяют **жидкостные системы охлаждения**, у которых значимо более высокая эффективность при умеренных габаритах, так как теплопроводность жидкости-хладагента (вода, тосол, спирт, трансформаторное масло, жидкий азот, ртуть и др.) в пять - семь раз выше, чем у воздуха (соответственно меньше и её тепловое сопротивление, а тепловой поток выше).

В подобных системах небольшой теплообменник, объем которого существенно меньше, чем у воздушного радиатора, закрепляется на поверхности ЭРЭ. Из него по трубке с помощью микронасоса жидкость перекачивается в герметичный наружный радиатор, который может обдуваться наружным вентилятором. Недостатки жидкостных систем охлаждения связаны, прежде всего, с возможностью протечек хладагента, способных вывести из строя всё РЭС. Увеличенный шум (вентилятор и микронасос), повышенная стоимость и невысокая надёжность (изнашивающиеся элементы) также не способствуют широкому применению жидкостных систем охлаждения.

**Тепловая труба** (Таблица 2.6) — это герметическое теплопередающее устройство, которое работает по замкнутому испарительно-конденсационному циклу в тепловом контакте с внешними — источником и стоком тепла. Тепловые трубы широко используются для нагрева, охлаждения и терморегулирования радиоэлектронной аппаратуры. Их целесообразно употреблять при конструктивной невозможности жидкостного охлаждения или охлаждения с применением вентилятора.

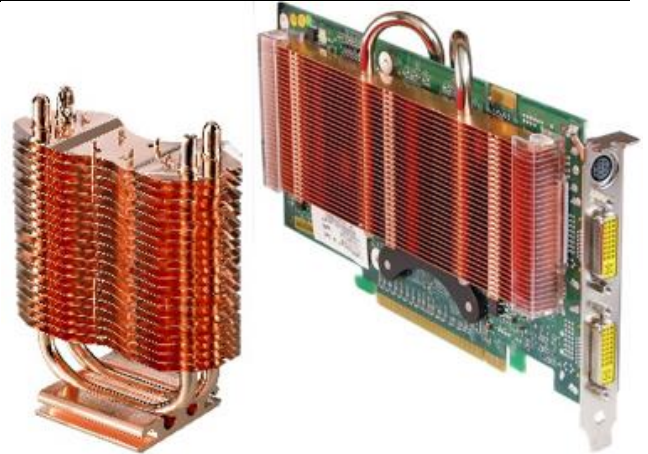
Таблица 2.6 - Конструкции систем с тепловыми трубами

<p>Тепловая трубка представляет собой закрытую трубку из теплопроводящего металла (например, меди), в которой находится легкокипящая жидкость (аммиак, метанол, этанол и т.п.). Внутренняя поверхность трубы представляет собой капиллярно-пористую структуру и играет роль фитиля.</p>	
<p>Перенос тепла происходит за счёт того, что жидкость испаряется на горячем конце трубки, поглощая теплоту испарения, и конденсируется на холодном. Здесь пар конденсируется на стенках, впитывается фитилём и жидкость под действием капиллярных сил снова поступает по фитилю в зону испарения.</p>	 <p>Тепло поступает</p> <p>Под давлением жидкость проходит в пористый материал</p> <p>Пар</p> <p>Тепло отводится</p> <p>Жидкость возвращается</p> <p>Пористая структура позволяет жидкости свободно проходить</p>

Один конец тепловой трубки подключают к источнику тепла, а другой — к приёмнику — радиатору, который может охлаждаться вентилятором. В результате интенсивного теплообмена количество отводимого тепла получается во много раз больше, чем при использовании радиаторов из меди или серебра.



Применение больших радиаторов совместно с тепловыми трубками, пронизывающих рёбра радиатора в нескольких местах, позволяет ускорить распространение тепла по всему объёму радиатора, из-за чего улучшается теплообмен с окружающей средой, нет шума и потребления энергии.

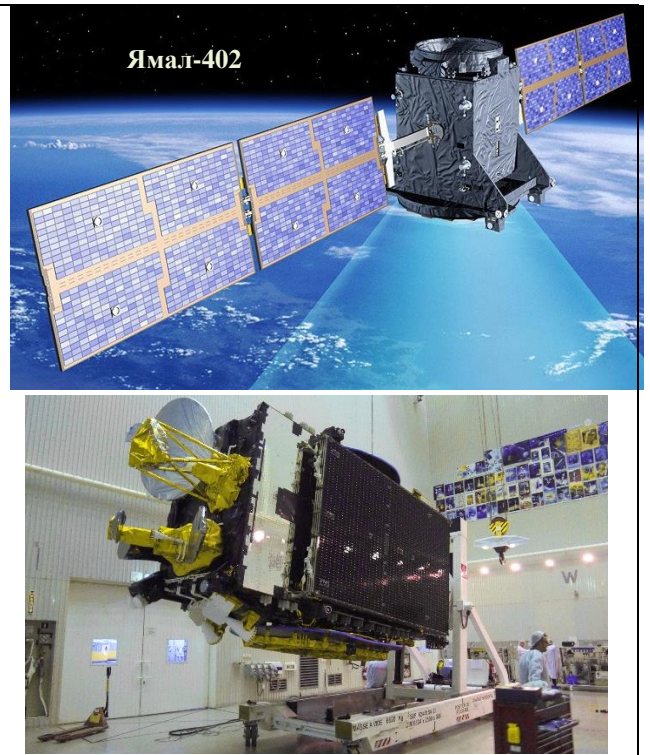


Особенно полезно применение тепловых труб для переброса тепловых потоков от тепловыделяющих узлов к местам, где возможен их эффективный съём - например, за пределы корпуса РЭС или современных мощных компьютерных систем (в ноутбуках, в силовой электронике и т.п.).





Кроме отвода тепла от элементов РЭС и других тепловыделяющих устройств, тепловые трубы широко используются в космической технике для снижения разности температур между поверхностью, обращённой к солнцу, и холодной поверхностью космического аппарата, внутри которого создаётся относительно равномерное температурное поле, что позволяет снизить механические напряжения, проще решать задачи стабилизации температуры и т.п.



Французский физик Жан Пельтье в 1834 году обнаружил, что при протекании постоянного электрического тока через цепь из различных проводников, место соединения проводников охлаждается или нагревается в зависимости от направления тока, причём количество поглощаемой теплоты пропорционально току, проходящему через проводники (Рис. 2.11).

Сам по себе элемент Пельтье может обеспечить только хороший отвод тепла от нагревающегося компонента. Чтобы эффективно рассеивать это тепло, необходимо устанавливать на горячую сторону элемента довольно мощный вентилятор или делать жидкостное охлаждение (Рис. 2.12).

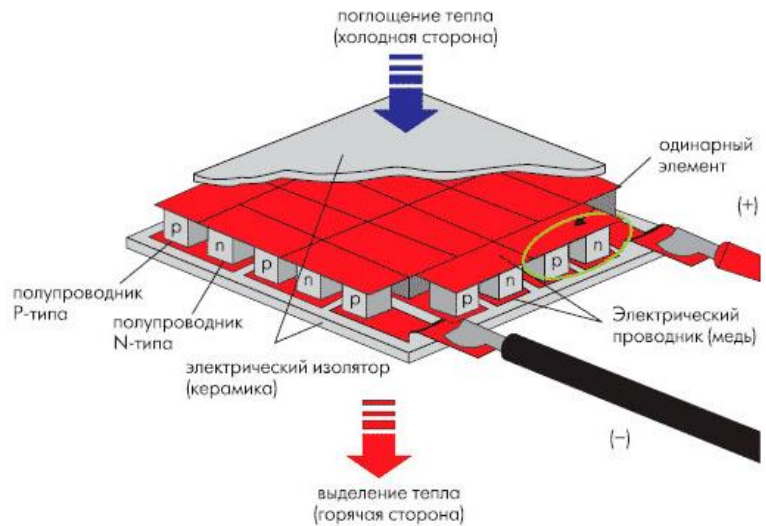


Рис. 2.11 - Устройство и внешний вид термоэлектрических модулей (элементов Пельтье), которые позволяют получить разность температур до 74–76 К

В настоящее время термоэлектрические модули активно используются в таких высокотехнологичных областях, как телекоммуникации, космос, ядерные установки, высокоточное оружие, медицина и в других современных лазерных, оптических, радиоэлектронных системах.

Достоинства систем охлаждения с использованием эффекта Пельтье:

- относительно простая и недорогая конструкция;
- значительная мощность теплопередачи при маленьких габаритных размерах;
- возможность плавного и точного регулирования холодопроизводительности и температурного режима;
- лёгкость перехода из режима охлаждения в режим нагрева;
- бесшумность работы;
- большой срок службы.

Недостатки:

- большие потребляемые токи и отдельное стабильное питание. охлаждения на
- дополнительный нагрев и низкий КПД (до 10%).

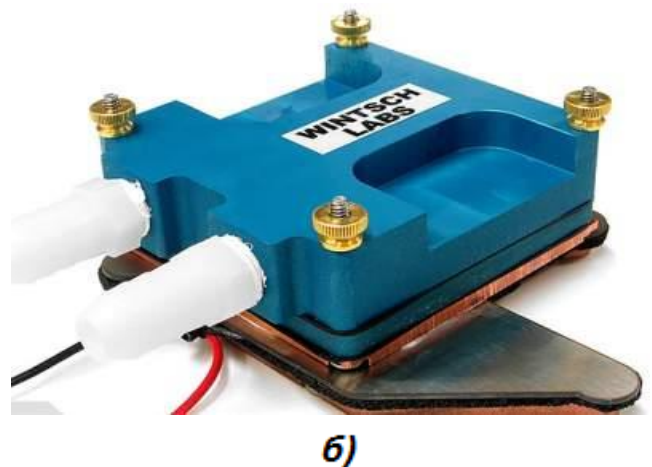


Рис. 2.12 – Системы базе модулей Пельтье: а) воздушное; б) жидкостное (видеокарта GeForce 6800 компании Ultra Arctic Spider мощностью 437 Вт, на который установлен водоблок. Система дополнительно потребляет 600 Вт)

Подводя итог, можно сделать следующие выводы.

В ходе проектирования РЭС всегда возникает задача расчёта и анализа тепловыделения, на основании которого производится выбор конструктивных решений при проектировании систем. Прежде чем приступить к разработке конструкции РЭС, необходимо установить допустимую тепловую нагрузку всех радиоэлектронных элементов, а также параметры их реальных режимов эксплуатации.

Отвод тепла из блока РЭС к внешней поверхности кожуха, в котором имеются тепловыделяющие элементы, может осуществляться за счёт теплопроводности, конвекции и излучения. В большинстве случаев для РЭС, особенно бортовых, в этом случае основным механизмом отвода тепла является теплопроводность. Отвод тепла излучением эффективен при высоких температурах нагретой зоны (более 100 .. 150°C), а надёжная работа РЭС при таких температурах невозможна. При достаточно высокой плотности компоновки конвективный перенос тепла внутри блока может быть затруднён из-за малого сечения воздушных каналов. Отвод тепла от кожуха блока во внешнюю среду осуществляется теми же механизмами. За счёт естественной конвекции в условиях, когда давление среды не ниже 50% от нормального, от блока можно отвести не менее 90% выделяемой в нём тепловой мощности. При этом поверхностная плотность тепловыделения не должна превышать 0,02 Вт/см<sup>2</sup>. Если тепловыделение превышает указанный уровень, то необходимо переходить на принудительное охлаждение: воздушную вентиляцию, жидкостное или испарительное охлаждение блока.

Расчёты тепловых режимов РЭС базируются на методе электротепловой аналогии, который позволяет сводить расчёт тепловых систем к расчёту электрических схем по основным правилам электротехники. Для этого тепловые величины заменяются их электрическими аналогами, после чего рассчитывается электрическая схема и находится искомая тепловая величина. При этом аналогом теплового потока (мощности нагретой зоны  $P_{нз}$ ) в тепловой цепи является ток на участке электрической цепи; аналогом разности температур  $\Delta T$  нагретой зоны  $T_{нз}$  и температуры окружающей среды  $T_{ср}$  (или перегрева) на участке тепловой цепи является падение напряжения на участке электрической цепи; аналогом теплового сопротивления  $R_t$  соответствует электрическое сопротивление  $R$ , а тепловой проводимости  $\delta$  - электропроводность.

Можно предложить несколько конструктивных решений, направленные на обеспечение приемлемого теплового режима:

- 1) важно всемерно обеспечить эффективный отвод тепла от источника во внешнюю среду (перфорация корпуса, расположение плат, широкие воздушные каналы и т.д.);
- 2) необходимо разнести на максимальное расстояние теплочувствительные элементы от максимально нагретых и обеспечить теплоизоляцию их друг от друга;
- 3) если это не противоречит условиям электромагнитной совместимости или другим важным параметрам РЭС, то теплонагруженные и теплочувствительные радиоэлектронные элементы лучше разнести по разным блокам;
- 4) тепловыделяющие элементы желательно располагать ближе к корпусу или непосредственно на его стенках;

5) для улучшения теплоотвода разумно использовать массу металлических шасси, на которых крепятся узлы и элементы РЭС. Там, где это возможно, размеры шасси и толщину их материала следует выбирать не только из соображений механической прочности, но и достаточной массы для обеспечения высоких теплопоглощения и теплопередачи.

6) в качестве конструкционных материалов целесообразно выбирать материалы с высокой теплопроводностью, а в качестве теплоизоляции - материалы с низкой теплопроводностью (Таблица 2.7);

Таблица 2.7 - Коэффициенты теплопроводности некоторых конструкционных материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·град
Воздух	0,027
Пенопласт	0,03 - 0,06
Слюда	0,52
Вода	0,58
Стеклотекстолит	0,4 - 0,74
Стекло	0,74
Ситалл	1,3 - 1,5
Керамика на основе оксида алюминия ( $Al_2O_3$ )	18 - 24
Кремний	84-126
Керамика на основе оксида бериллия ( $BeO$ )	220 - 240
Керамика на основе нитрида алюминия ( $AlN$ )	200 -240
Сталь	45 - 92
Припой	75
Алюминий	230
Золото	320
Медь	390
Серебро	430
Алмаз	до 2600
Графен	до 5300
Тепловые трубы	до $10^5 - 10^6$

7) чем ниже тепловое сопротивление, тем выше теплопередача. Поэтому для повышения эффективности теплового охлаждения необходимо всемерно снижать тепловое сопротивление переходных слоёв компонентов РЭС (кристалл - подложка, подложка - основание, основание - радиатор) с помощью теплопроводящих клеев, паст, подложек, пайки, хорошего прижима;

8) для ослабления переноса тепла от нагретой зоны в сторону, противоположную корпусу или радиатору, целесообразно использовать тепловые экраны с применением материалов с низкой теплопроводностью;

9) Из приведённой выше таблицы видно, что значение коэффициентов теплопроводности различных керамик близки к коэффициентам теплопроводности металлов, что позволяет существенно улучшить теплоотдачу при конструировании микросхем и некоторых видов РЭС. Керамическим подложкам характерны повышенная устойчивость к воздействию теплового удара, влаги и химическим реагентам, высокая твёрдость, широкий диапазон рабочих температур и механических нагрузок, хорошие диэлектрические и тепловые свойства, а также повышенная стабильность размеров. У металлов, кремния и керамики невысокие коэффициенты температурного линейного расширения, достаточно близкие в широком температурном диапазоне, что позволяет создавать высоконадёжные в эксплуатации монтажные СВЧ- и ВЧ-платы для поверхностного монтажа беспроводных коммуникационных систем, станций сотовой связи, мобильных коммуникационных систем. космической, медицинской и другой аппаратуры.

Для определения исходных параметров конструкции расчёт охлаждения аппаратуры можно провести только приближённо [24,25]. Более точные расчёты температурных полей ведут с помощью компьютерных систем теплового моделирования [28,29,30,31].

#### 2.1.4 Анализ климатических воздействий

Защита от влияния климатических условий - одна из жизненных задач проектирования РЭС. Влияние климатических факторов на конструкционные материалы выражается главным образом в возникновении процессов коррозии, потере механических и диэлектрических свойств, изменении электропроводности.

Таблица 2.8 знакомит с некоторыми группами РЭС, для которых ГОСТ 16019-2001 [3] устанавливает нормы механических и климатических воздействий в зависимости от условий эксплуатации.

Таблица 2.8 - Группы РЭС по механическим и климатическим воздействиям

Название группы	Характеристика и условия эксплуатации группы
<b>С1</b>	Стационарная, устанавливаемая в отапливаемых наземных и подземных сооружениях
<b>С2</b>	Стационарная, устанавливаемая под навесом, на открытом воздухе или в неотапливаемых наземных и подземных сооружениях
<b>В3</b>	Возимая, устанавливаемая во внутренних помещениях речных судов
<b>В4</b>	Возимая, устанавливаемая в автомобилях, мотоциклах, в сельскохозяйственной и другой технике
<b>В5</b>	Возимая, устанавливаемая в подвижных железнодорожных объектах
<b>Н6</b>	Носимая, размещаемая при эксплуатации в одежде или под одеждой оператора, или в отапливаемых наземных или подземных сооружениях
<b>Н7</b>	Портативные, предназначенные для длительной переноски на открытом воздухе при облегчённых внешних воздействиях или в отапливаемых наземных и подземных сооружениях и работающие на ходу

Для разрабатываемого РЭС следует установить диапазоны рабочих температур, влажности и давления исходя из климата, категории исполнения и места размещения. В ТЗ задаются параметры **климатических воздействий на разрабатываемое РЭС** (пониженная, повышенная и циклическая смена температуры, повышенное и пониженное атмосферное давление, влага в виде дождя, инея, росы, снега или повышенного содержания водяных паров в атмосфере, солнечная радиация, примеси в воздухе в виде пыли, промышленных газов, морского тумана, ветер, различные биологические факторы, коррозионная агрессивность атмосферы [32]).

Определённое сочетание перечисленных выше факторов образуют ту или иную климатическую зону.

Нормальными значениями климатических факторов внешней среды считаются:

- температура  $25 \pm 10$  °С;
- относительная влажность воздуха 45 .. 80%;
- атмосферное давление 64,0 .. 106,7 кПа (630 .. 800 мм рт. ст.), соответствующее высоте работы РЭС до 1000 м над уровнем моря;
- отсутствие активных веществ в окружающей атмосфере.

Условия эксплуатации РЭС (в частности, печатных плат) ГОСТ 23752-79 [33] классифицируют по **группам жёсткости** (англ. *group of performance*), отличающихся по стойкости печатных плат к внешним воздействующим факторам, определяющих их область применения в аппаратуре.

К изделиям каждой группы жёсткости предъявляются соответствующие требования к конструкции и используемым материалам, которые характеризуют необходимую дополнительную защиту от климатических, механических, биологических и других воздействий (Таблица 2.9), а также методику их испытаний. Выбранную группу жёсткости следует указать в конструкторской документации.

Таблица 2.9 - Виды и величины воздействующих факторов по группам жёсткости

Наименование воздействующего фактора		Значение воздействующего фактора по группам жёсткости			
		1	2	3	4
Температура окружающей среды	Повышенная температура, °С	85 ± 3		100 ± 3	120 ± 5
	Пониженная температура, °С	-60 ± 3			
	Время выдержки, ч	2			
Повышенная влажность	Относительная влажность, %	93 ± 3			
	Температура, °С	40 ± 2			
	Время выдержки, сут.	2	4	10	21
Циклическое воздействие	Верхнее значение температуры, °С	55 ± 3	85 ± 5	100 ± 3	120 ± 5
	Нижнее значение температуры, °С	-40 ± 3	-60 ± 3		

	Количество циклов	2	4	9
Давление, Па (мм рт. ст.)		Нормальное	53600 (400)	666 (5)

В соответствии с принятой в ГОСТ 15150-69 [2] классификацией следует определить **макроклиматические районы эксплуатации разрабатываемой РЭС** (Таблица 2.10).

Таблица 2.10 - Типы климатов и макроклиматов исполнения РЭС

Климатические исполнения изделий	Обозначения		
	буквенные		цифровые
	русские	латинские	
<b>Изделия, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озёрах</b>			
Для макроклиматического района с умеренным клима-	У	(N)	0
Для макроклиматических районов с умеренным и холод-	УХЛ	(NF)	1
Для макроклиматического района с влажным тропиче-	ТВ	(TH)	2
Для макроклиматического района с сухим тропическим	ТС	(TA)	3
Для макроклиматических районов как с сухим, так и с	Т	(T)	4
Для всех макроклиматических районов, кроме макро-	О	(U)	5
<b>Изделия, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с морским климатом</b>			
Для макроклиматического района с умеренно-холод-	М	(M)	6
Для макроклиматического района с тропическим мор-	ТМ	(TM)	7
Для макроклиматических районов как с умеренно-хо-	ОМ	(MU)	8
Изделия, предназначенные для эксплуатации во всех	В	(W)	9

Любое РЭС может иметь **климатическое исполнение**, соответствующее указанным районам, что отмечается в документации сокращённо теми же буквами, какими обозначен район:

- изделие предназначенное для работы как при влажном, так и при сухом тропическом климате обозначают буквой Т;
- исполнение, допускающее работу во всех климатических районах на суше, обозначают буквой О;
- исполнение для всех морских районов - буквой М;

– исполнение для всех районов на суше и на море - буквой **В** и т.д.

Конкретные значения температуры и влажности воздуха для различных климатических исполнений и категорий аппаратуры указаны в соответствующих стандартах.

Таблица 2.11 знакомит с категориям исполнения РЭС в зависимости от места размещения.

Таблица 2.11 – Обозначения основных категорий исполнения РЭС в зависимости от климатических условий в соответствии с ГОСТ 15150-69 [2]

Укрупнённая категория	Обозначение	Дополнительная категория	Обозначение
Для эксплуатации на открытом воздухе (воздействие совокупности климатических факторов, характерных для данного макроклиматического района)	1	Для работы и эксплуатационного хранения в помещениях категории 4 и для кратковременной работы в других условиях	1.1
Для эксплуатации под навесом или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе и имеется доступ наружного воздуха (кузова, навесы), а также в изделии категории 1 или под навесом.	2	Для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категорий 1; 1,1; 2, конструкция которых исключает возможность конденсации влаги на встроенных элементах (например, внутри радиоэлектронной аппаратуры)	2.1
Для эксплуатации в закрытых помещениях (объёмах) с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, например, в металлических с теплоизоляцией, бетонных, где колебания температуры и влажности воздуха, а также воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе.	3	Для эксплуатации в нерегулярно отапливаемых помещениях	3.1
Для эксплуатации в закрытых помещениях (объёмах) с искусственно регулируемыми климатическими условиями, например, в закрытых отапливаемых или охлаждаемых и вентилируемых производственных и других помещениях	4	Для эксплуатации в помещениях с кондиционированным или частично кондиционированным воздухом	4.1
		Для эксплуатации в лабораторных, капитальных жилых и других подобного типа помещениях	4.2



Для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью (например, подвалах, судовых, корабельных помещениях, в которых возможно длительное наличие воды)	5	Для эксплуатации в качестве встроенных элементов внутри комплектных изделий категории 5, при условии отсутствия на них конденсации влаги	5.1
---	---	--	-----

Значения рабочих температур и влажности определяются макроклиматической зоной и категорией исполнения в соответствии с ГОСТ 15150-69 [2]. Таблица 2.12 знакомит с рекомендуемыми значениями рабочих температур окружающего воздуха при эксплуатации РЭС различных категорий климатических исполнений.

Таблица 2.12 - Значения рабочих температур воздуха для климатических исполнений РЭС

Исполнение изделия	Категория изделий	Температура воздуха, °С	
		верхняя	нижняя
У	1; 1.1; 2; 2.1; 3	+40	-45
	3.1	+40	-40
	5; 5.1	+35	-5
УХЛ	1; 1.1; 2; 2.1; 3	+40	-60
	3.1	+40	-10
	4	+35	+1
	4.1	+25	+10
	4.2	+35	+10
	5; 5.1	+35	-10
Т, ТС	1; 1.1; 2; 2.1; 3; 3.1	+50	-10
	4	+45	+1
	4.1	+25	+10
	4.2	+45	+10
	5; 5.1	+35	+1
ТВ	1; 1.1; 2; 2.1; 3; 3.1; 4	+40	+1
	4.1	+25	+10
	4.2	+45	+10
	5; 5.1	+35	+1
О	1; 1.1; 2; 2.1	+50	-60
	4	+45	+1
	4.1	+25	+10
	4.2	+45	+10
	5; 5.1	+35	-10
М	1; 1.1; 2; 2.1; 3; 5; 5.1	+40	-40
	3.1; 4	+40	-10
	4.1	+35	+15
	4.2	+40	+1
ТМ	1; 1.1; 2; 2.1; 3; 5; 5.1	+40	+1
	4; 4.2	+40	+1
	4.1	+35	+10
ОМ	1; 1.1; 2; 2.1; 3; 5; 5.1	+45	-40
	3.1; 4	+45	-10
	4.1	+35	+15
	4.2	+40	+1

В	1; 1.1; 2; 2.1; 3	+50	-60
	3.1	+50	-10
	4	+45	-10
	4.1	+25	+10
	4.2	+45	+1
	5; 5.1	+45	-40

В зависимости от макроклиматического района, разрабатываемые РЭС могут иметь определённые особенности. Отдельные климатические факторы могут проявлять себя независимо от остальных, а другие факторы - в совместном воздействии с прочими факторами той или иной группы. Существует определённая связь между конкретным видом внешнего воздействия на аппаратуру и ускоряемым с его помощью физико-химическим процессом в конструкции.

- В районах с **умеренным климатом (У)** (европейская часть России, южная часть Западной Сибири, Приморский край, большая часть Европы, США, прибрежные территории Австралии, Южной Африки и Южной Америки) температура воздуха лежит в пределах от +40 до -45 °С, годовой перепад температур для некоторых районов достигает 80 °С, среднесуточный — до 40 °С. Для таких районов характерно образование инея, выпадение росы, наличие тумана, изменение давления воздуха от 86 до 106 кПа.

РЭС в большинстве случаев не требуют особенных средств защиты.

- В районах с **холодным климатом** минимальная температура ниже -45 °С (почти вся Сибирь и Дальний Восток, Канада, Аляска, Гренландия) условия эксплуатации РЭС более тяжёлые. При эксплуатации РЭС в арктических и антарктических условиях температура воздуха может понижаться до - (70 .. 80)°С. То же самое происходит и при подъёме на высоту более 10 км. Особенностью этой климатической зоны является высокая прозрачность атмосферы, из-за чего может возникнуть ионизация воздуха и, как следствие, накопление на поверхности аппаратуры статического электричества. Характерной особенностью этого региона является также сочетание **низких температур с сильным ветром**, что приводит к обледенению, выпадению инея, мелкой снежной пыли. В конструкции органов управления и контроля должны быть учтено, что оператор может работать в тёплой одежде и перчатках.

- В районах с **влажным тропическим климатом** (большая часть Центральной и Южной Америки, средняя часть Африки, Юг Индии, Индонезия, часть Юго-Восточной Азии) температура больше +20°С с перепадом температур за сутки не более 10°С. Высокая температура в сочетании с высокой относительной влажностью (более 80%), которая наблюдается не менее 12 часов в сутки, вызывает образование на поверхности материалов плёнки жидкости, что вызывает ускоренную коррозию металлов, набухание пористых (в том числе и изоляционных) материалов и изменение их электрофизических свойств, развитие плесени. Сопротивление изоляции после поглощения воды существенно снижается. Высокая влажность и повышенная концентрация солей (особенно вблизи побережья морей и океанов) делает атмосферу этой зоны коррозионно-агрессивной. В промышленных

районах в атмосфере содержится сернистый газ и хлориды, ускоряющие коррозию. Благоприятное сочетание температуры и влажности способствует существованию огромного числа видов плесневых грибов.

- Для районов с **сухим тропическим климатом** (северная часть Африки, центральная Австралия, засушливые районы Средней Азии, Аравийский полуостров, часть Северной Америки) температура воздуха превышает + 40°C, а влажность ниже норм. Из-за повышенной температуры, малой влажности, наличия песка и пыли, интенсивного воздействия солнечной радиации (до 1500 Вт/м<sup>2</sup>), могут изменяться размеры элементов конструкции, размягчение, коробление и высыхание некоторых материалов. Высокое содержание пыли и песка в атмосфере способствует отрицательному абразивному и химическому воздействию на РЭС. Часто уже при относительно небольшой влажности пыль существенно повышает скорость коррозии - обычную во влажных помещениях или на открытом воздухе.

Для защиты от пыли конструкция подобных РЭС должна иметь надёжные уплотнения в местах вводов осей механизмов и кабелей, системы вентиляции и термостабилизации.

- **Умеренно холодная морская зона** включает моря, океаны и прибрежные территории, расположенные севернее 30° северной широты и южнее 30° южной широты. Остальная часть морей, океанов и прибрежных территорий относится к тропически морской зоне. Климат морских зон отличается сравнительно небольшими суточными перепадами температур, наличием высокой влажности и значительной концентрацией хлоридов в атмосфере.

Учитывая специфику каждой из климатических зон, РЭС наземного базирования, предназначенные для работы в тропических зонах, должны быть изготовлены в соответствующем исполнении, что отмечается в документации индексом Т. РЭС, устанавливаемые на судах с неограниченным районом плавания, имеют обозначение ОМ. РЭС, пригодные для эксплуатации на суше и на море, имеют индекс В.

Как повышенные, так и пониженные температуры влияют на место установки РЭС, расположение источников внешнего нагрева, выделение тепла активными элементами внутри РЭС и суточным изменением температуры окружающей среды. Так как электрические параметры микросхем и других ЭРЭ температурозависимы, нужно, чтобы температура нагрева наиболее чувствительных к окружающей температуре элементов находилась в допустимых для этих элементов пределах.

- **Холодоустойчивое** РЭС должно быть сконструировано так, чтобы при заданной отрицательной температуре его параметры сохранялись в заранее установленных пределах.

Следует учитывать, что значительно изменяются геометрические размеры деталей. Понижение температуры оказывает влияние на работу электромеханических устройств, так как её большие перепады (например, при подъёме самолёта от + 20 до - 60°C) приводят к изменениям зазоров и натягов, поскольку материалы конструкций РЭС имеют разные коэффициенты линейного расширения. Одновременно происходит значительное возрастание вязкости (сгущение) жидкостей и, в особенности, смазочных веществ, что вызывает

увеличение моментов и сил трения в подвижных устройствах и может привести к заклиниванию механизмов. При понижении температуры окружающего воздуха резко снижается прочность материалов. Многие материалы становятся хрупкими, что особенно опасно при ударных нагрузках. Существенно меняются и многие параметры ЭРЭ, ухудшаются электрические параметры деталей и узлов, ухудшается работа гальванических элементов. При низких температурах в припое возникают внутренние напряжения, и так как припой плохо работает на растяжение, то возможно разрушение паяных корпусов РЭС, мест пайки и т.д.

- **Теплоустойчивые** РЭС должны сохранять стабильность параметров в определённых пределах при повышении температуры.

При работе РЭС в районах с тропическим климатом температура воздуха может повышаться до +45°, а в отдельных случаях и более. В закрытых помещениях, находящихся под непосредственным воздействием солнца (в самолёте, который стоит на земле), температура воздуха может достигать +70 °С.

Обшивка сверхзвукового самолёта или обтекателя ракеты могут нагреваться в результате трения о встречный газовый поток до +150 .. 200°С, а расположенные в них РЭС будут работать при температуре порядка +100°С и выше.

Чрезвычайно опасен **тепловой удар** (термоудар), характеризующийся резким изменением температуры окружающей среды. При этом за несколько минут перепад температуры может составлять десятки градусов. Тепловой удар вызывает механические напряжения в местах пайки и других подвижных соединениях, растрескивание металлических и неметаллических покрытий. В особенности циклические тепловые удары (самолёты, ракеты, космические аппараты) значительное влияние оказывают на элементы конструкции, в которых имеются локальные механические напряжения, способствуя образованию микротрещин, их росту и объединению.

Многие конструктивные материалы при высоких температурах претерпевают структурные изменения (тепловое старение материалов).

Повышение температуры окружающего воздуха вызывает увеличение сопротивления проводниковых материалов и ухудшение параметров изоляционных материалов (особенно органических). Например, перегрев технической меди на 100°С приводит к увеличению сопротивления на 40 %.

Значительно увеличивают свою проводимость с повышением температуры полупроводниковые материалы, что может привести к существенному изменению электрических режимов в схеме. При повышении температур свыше +85 .. 100°С в германиевых и +120 .. 150°С в кремниевых полупроводниковых приборах наступают необратимые изменения, приводящие к выходу их из строя.

При длительной работе РЭС в условиях повышенной температуры могут появиться необратимые изменения параметров изоляционных материалов. Происходит уменьшение электрической прочности диэлектриков, что может приводить к пробоям в схеме и полному отказу РЭС.

Происходящее при изменении температуры окружающей среды уменьшение сопротивления изоляции приводит к увеличению потерь, к появлению утечек в схемах, к

уменьшению добротности контуров и к другим нежелательным явлениям – например, меняется диэлектрическая проницаемость диэлектриков. Если диэлектрик, у которого температурное изменение велико, применить в конденсаторе, образующем вместе с катушкой резонансный контур, то при изменении температуры будет меняться и частота настройки контура. При этом изменится уровень сигнала передатчика или приёмника, где этот контур используется, что может привести к потере связи.

Следует учесть, что условия, в которых находятся ЭРЭ, могут отличаться от условий, в которых работает вся РЭС. Так, из-за выделяемого в РЭС тепла температура внутри корпуса может значительно превышать температуру окружающей среды. При хорошей герметизации корпуса влажность воздуха вблизи ЭРЭ может быть существенно ниже влажности окружающего воздуха и т.д.

Повышение температуры приводит резкому снижению надёжности работы большинства ЭРЭ. Так при повышении температуры с 20 до 60 °С интенсивность отказов возрастает: у электронно-вакуумных приборов в 1.5 .. 2 раза, у резисторов в 2 .. 3 раза, у полупроводников приборов в 3 .. 4 раза, у конденсаторов в 6 .. 8 раз, у микросхем в 6 .. 10 раз.

Очевидно, тепловой режим является важнейшим фактором, определяющим эксплуатационную надёжность РЭС, и задача проектировщика обеспечить нормальный тепловой режим [22,24,25,34].

- **Влагоустойчивое** РЭС должно сохранять параметры в заранее установленных пределах при работе в среде с повышенной относительной влажностью. При конструировании таких РЭС следует особо тщательно подойти к выбору материалов и их покрытий. Конструкция таких РЭС часто бывает герметичной и имеет улучшенную влагозащиту (Рис. 2.13).



Рис. 2.13 - Для исключения проникновения внутрь влаги между половинками герметичного алюминиевого корпуса установлена резиновая прокладка.

Таблица 2.13 знакомит с рекомендуемыми значениями влажности окружающего воздуха при эксплуатации РЭС различных категорий исполнений.

Таблица 2.13 - Значения влажности воздуха для климатических исполнений РЭС

Исполнение изделий	Категория изделий	Относительная влажность	Абсолютная влажность, г·м <sup>-2</sup>
УХЛ	4; 4.1; 4;2	80 % при 25 °С	10
У, УХЛ (ХЛ), ТУ	1; 2; 5	100 % при 25 °С	11
	1.1; 2.1; 3; 3.1;	98 % при 25 °С	10
	5.1	98 % при 25 °С	13
ТС	1; 1.1; 2; 3; 3.1;	100 % при 25 °С	10 .. 13
	4; 4.1; 4.2; 5.1	80 % при 25 °С	10 .. 13
Т, ТВ, О, В, ТМ,	1; 2; 5	100 % при 35 °С	20
ОМ	1.1; 2.1; 5.1	98 % при 35 °С	17 .. 20
ТВ, Т, В,	3; 3.1; 4; 4.2	98 % при 35 °С	17
ТМ, ОМ	4.1	80 % при 25 °С	10
М	1; 2; 5	100 % при 25 °С	15
	1.1; 3; 3.1; 4;	98 % при 25 °С	11
	2.1; 5.1	98 % при 25 °С	15
	4.1	80 % при 25 °С	10

Как видно из приведённой выше таблицы, количество влаги, содержащейся в воздухе при различных климатических условиях, различно. В областях умеренного климата относительная влажность воздуха составляет 65 .. 80%; в пустынях она может уменьшаться до 5 .. 10%, а в тропиках - достигать 100% при температуре воздуха до +35°С.

Понижение температуры сопровождается уменьшением количества паров воды в воздухе, поэтому суточные колебания температуры могут сопровождаться конденсацией влаги (выпадением росы) на холодных внутренних поверхностях конструкции РЭС. Выпадение росы на элементы РЭС происходит при определённой температуре (точка росы), значение которой зависит от относительной влажности атмосферы (Таблица 2.14).

Таблица 2.14 – Зависимость температуры точки росы от относительной влажности

Относительная влажность, %	100	80	60	40	20
Точка росы, °С	15,5	12,1	7,8	2,0	-6,6

Подобные явления могут произойти и при попадании самолёта в насыщенный влагой воздух (туман), если температура РЭС ниже температуры воздуха. Капли конденсата будут стекаться и собираться в местах «ловушек влаги». В результате РЭС будет находиться под постоянным воздействием влаги.

Влажность меняет многие свойства поверхности металлов: прочность, электропроводность, теплопроводность, степень черноты, степень шероховатости и т.п. Воздействуя на металлы, влага вызывает появление коррозии металлов. В результате коррозии ухудшается декоративный вид поверхностей, зеркальные поверхности теряют отражательную способность, разъёмные соединения труднее разъединяются. При коррозии может происходить разгерметизация герметичных металлических корпусов.

Опасно воздействие влажности на электрические соединения. При повышенной влажности подвергаются коррозии проводники, на разъёмных контактах появляются налёты, ухудшающие их качество, отказывают паяные соединения, особенно если они загрязнены. Из-за уменьшения поверхностной электрической проводимости при коррозии увеличивается переходное сопротивление контактов реле, переключателей и других коммутирующих элементов, снижается добротность катушек индуктивности.

При воздействии воздуха с высоким содержанием водяных паров, особенно при повышенной температуре, влага проникает внутрь изоляционных материалов через микротрещины или благодаря явлению диффузии. Так как проводимость воды значительно выше проводимости диэлектриков, то воздействие влаги приводит к резкому уменьшению сопротивления изоляции, росту потерь в диэлектрике и изменению относительной диэлектрической проницаемости. Повышенная влажность снижает сопротивление изоляции у коммутирующих устройств и между проводниками печатных плат функциональных узлов. В трансформаторах влага, проникая через трещины в заливке, уменьшает сопротивление изоляции и способствует развитию электрохимических процессов между витками, находящимися под разными потенциалами, что способствует возникновению пробоя.

Влажность ускоряет разрушение лакокрасочных покрытий, нарушает герметизацию и целостность заливки элементов влагозащитными материалами.

Отметим, что некоторые категории РЭС, эксплуатируемые в полевых условиях (наземные транспортируемые и переносные, морские) зачастую работают при непосредственном воздействии атмосферных осадков (дождь или брызги). Кроме того, в отдельных случаях возможна работа РЭС под водой.

Таким образом, повышенная влажность окружающей среды особенно опасна для РЭС, так как агрессивное воздействие паров воды на большинство используемых в РЭС материалов, приводит к изменению их электрофизических свойств и механических характеристик. Для защиты от воздействия повышенной влажности элементы ЭС, как правило, герметизируют, используя органические полимерные материалы [35]. Производят покрытие лаками, эмалями, обволакивание компаундами, литьевое прессование в пластмассу, герметизацию в готовые пластмассовые корпуса и т.д. Однако ни один из способов герметизации не обеспечивает идеальной влагозащиты из-за микрополостей в сварных и паяных швах корпусов, а при герметизации полимерными материалами - из-за способности последних сорбировать и пропускать пары воды.

- Негативное влияние на РЭС оказывают **биологические воздействия** (грибковые образования, насекомые, грызуны). Высокая влажность воздуха способствует образованию на органических изоляционных материалах плесневых грибов. Они развиваются на пластмассах, красках, лаках, коже, резине, текстиле. Хорошей питательной средой для плесени является канифоль, которая может оставаться на местах пайки. Грибковые образования в процессе своей жизнедеятельности выделяют лимонную, уксусную, щавелевую кислоты и другие химические вещества, под действием которых изменяются характеристики многих материалов. Активно поглощая воду, эти вещества способствуют ускорению процессов коррозии, ухудшают электроизоляционные свойства изоляции, ускоряется процесс коррозии

металлов, разрушаются защитные покрытия, нарушаются контакты, возможны замыкания, пробой и т.п. Появление плесени многократно усиливает воздействие влаги на РЭС.

Идеальные условия для развития плесени: температура +25 .. +35 °С, относительная влажность 80 .. 100 %, неподвижный воздух, отсутствие света (особенно ультрафиолетовой и инфракрасной частей спектра).

Часто причиной коротких замыканий и прочих нарушений работы РЭС служат большие скопления насекомых. В некоторых тропических районах водятся **термиты** (белые муравьи), которые, попадая в РЭС, поедают древесину, картон, бумагу, пластмассы с древесным наполнителем и некоторые другие органические материалы. Тараканы, забираясь внутрь РЭС, повреждают изоляцию и нарушают контакты коммутирующих устройств. Среди других видов насекомых наиболее опасна моль (повреждает натуральные и искусственные ткани). Выделения термитов, тараканов, красных муравьёв и других насекомых увеличивают проводимость между проводниками, что может привести к нарушению работы РЭС и к коротким замыканиям.

Грызуны повреждают различные РЭС, тару и упаковку, теплоизоляционные материалы, плёнки, кабель и т.д. Кроме прямого уничтожения материалов и изделий, грызуны загрязняют их выделениями и шерстью.

- На промышленных предприятиях и в промышленно развитых городах с тяжёлой индустрией РЭС могут эксплуатироваться в **воздухе, загрязнённом различными коррозионно-активными агентами** (озоном, хлором, аммиаком, сернистым газом и пр.). Коррозионно-активные агенты активизируют в конструкциях РЭС химические реакции, такие как физико-химическая коррозия металлов, разрушение покрытий и снижение сопротивления изоляции.

Все категории РЭС, особенно устанавливаемой на подвижных объектах, работают при интенсивном воздействии **пыли**. Попадая в смазочные материалы движущихся механических устройств, пыль вызывает окисление смазочных материалов, повышает у них трение и износ. Оседая на поверхности различных деталей и ЭРЭ, пыль создаёт хорошие условия для их увлажнения. Содержащиеся в пыли растворимые соли также хорошо поглощают влагу. При этом на поверхности металлов может происходить коррозия, а на поверхности изоляционных материалов адсорбция влаги. В печатных платах снижается сопротивление изоляции, что приводит к трудно обнаруживаемым отказам. Увлажнённая пыль способствует разрушению лакокрасочных покрытий. Пыль плохо проводит тепло, и оседание её на поверхностях тепловыделяющих элементов приводит к увеличению нагрева и отказу этих элементов.



**Влияние атмосферного давления.** Пониженное и повышенное давление окружающей среды зависит прежде всего от высоты над уровнем моря места, где эксплуатируется ЗА. На Рис. 2.14 приведён график изменения атмосферного давления от высоты над уровнем моря.

С увеличением высоты над поверхностью Земли на каждые 10 м атмосферное давление понижается примерно на 1 мм рт. ст.). Атмосфера все более разрежается и постепенно исчезают такие явления, как распространение звука, сопротивление воздушному потоку, возникновение аэродинамической подъёмной силы и т.д.). Содержание влаги в атмосфере с ростом высоты также уменьшается.

С понижением атмосферного давления увеличивается температура тепловыделяющих элементов, так как ухудшается теплоотдача от нагретых частей РЭС за счёт **конвекции**. Элементы РЭС уже не могут охлаждаться с помощью воздушных потоков и воздушных радиаторов в результате чего их температура повышается. На большой высоте и в космосе основными способами передачи тепла являются **кондукция и тепловое излучение**.

При проектировании РЭС, размещаемых в герметизированных отсеках космических

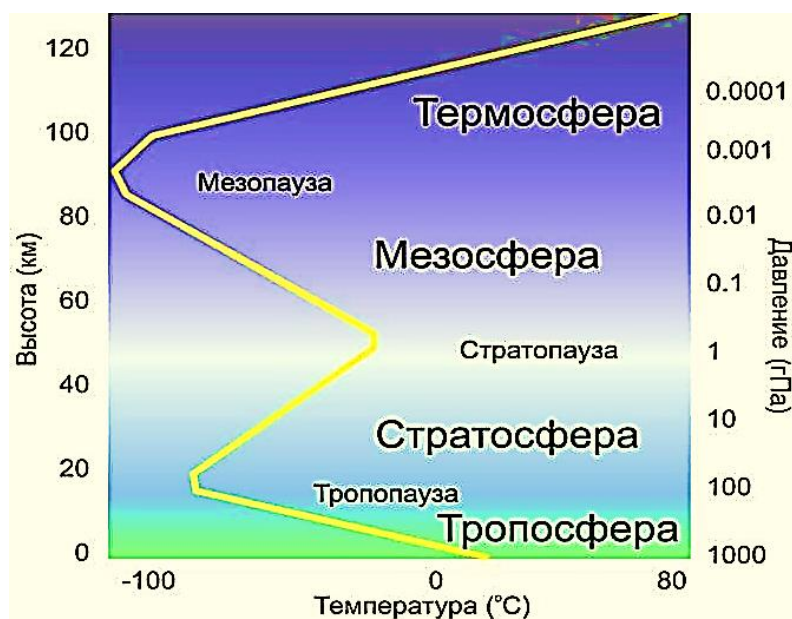


Рис. 2.14 - Зависимость температуры и давления воздуха от высоты над уровнем моря

аппаратов, следует учитывать воздействие **невесомости** на тепловой режим, которое характеризуется полным отсутствием естественной конвективной составляющей теплоотдачи от тепловыделяющих элементов и требует принудительной циркуляции воздуха с использованием вентиляторов.

РЭС, размещённые в негерметизированных отсеках космического аппарата, работают в условиях глубокого вакуума. Тепловое воздействие вакуума проявляется в снижении теплоотвода от выделяющих тепло элементов из-за отсутствия конвективного теплообмена и резкого падения теплопроводности газа. Передача теплоты осуществляется только с помощью лучистого обмена и кондуктивным способом. Ухудшение теплоотвода от изделий в глубоком вакууме вызывает перегрев и выход из строя РЭС.

Понижение давления воздуха сопровождается уменьшением его электрической прочности, что в ряде случаев может привести к пробоям воздушных промежутков.

Повышенное атмосферное давление может оказывать механическое воздействие на элементы конструкции РЭС.

### 2.1.5 Анализ радиационных воздействий

Под радиационными воздействиями следует понимать явления или процессы, внешние по отношению к РЭС, которые вызывают или могут вызвать нарушение или потерю их работоспособности в процессе эксплуатации. В состав радиационных факторов входят излучения, создаваемые ядерным взрывом, ядерными силовыми и энергетическими установками, и излучения, существующие в космическом пространстве (в том числе и солнечная радиация).

В первичных космических лучах различают галактические лучи, приходящие извне Солнечной системы, и солнечные лучи, связанные с активностью Солнца.

**Солнечная радиация** (ультрафиолетовое и инфракрасное излучения, а также излучение в видимой части спектра) активно воздействует на работоспособность РЭС:

- изменяет цвет и структуру поверхностного слоя материалов (каучука, пластмасс, тканей и др.);
- разлагает полимеры, содержащие хлор, например полихлорвинил;
- разрушает лакокрасочные покрытия;
- способствует старению ряда материалов, например пластмасс;
- ускоряет процесс атмосферной коррозии.

Одной из важнейших причин, по которой происходят нарушения работоспособности **РЭС на космических аппаратах**, являются космические лучи — элементарные частицы и ядра атомов, родившиеся и ускоренные до высоких энергий во Вселенной.

Основными источниками радиационной опасности на космических аппаратах являются три наиболее мощных и достаточно хорошо изученных радиационных поля, которые отличаются своим происхождением и состоят из потоков частиц с отличными энергетическими спектрами:

- **галактические космические лучи**, превосходящие по своей проникающей способности все другие виды излучений, кроме нейтрино;
- **солнечные космические лучи** - главный источник мощных потоков корпускулярного и электромагнитного излучений на Земле;
- **радиационные пояса Земли**.

Радиационное воздействие вызывает как немедленную, так и накапливающуюся реакцию элементов, составляющих конструкцию РЭС. Среди существующих видов излучений наибольшую опасность для РЭС представляют рентгеновское излучение и гамма-лучи (длина волн менее 10 нм). Эти виды излучения обладают значительной проникающей и ионизирующей способностью и характеризуются дозой и мощностью излучения.

Наиболее существенное влияние на работоспособность РЭС оказывают вызванные радиационными излучениями пробой *p-n*-переходов у полупроводниковых приборов, расплавление и обрывы токоведущих дорожек, мест пайки (сварки) проводов из-за термо- и электродинамических напряжений, сбои в работе и появление ложных сигналов.

Радиационная обстановка внутри и снаружи космического аппарата зависит от параметров его орбиты, и схема радиационной защиты электропроводки и электронного оборудования должна выбираться с учётом характеристик орбиты. На высотах ниже 450—500 км космонавты и РЭС находятся под защитой радиационных поясов Земли от космических лучей и солнечных протонов. На высотах более 500 км опасны протоны и нейтроны радиационного пояса Земли. На высотах более 30 тыс. км опасны космические лучи.

Наиболее чувствительны к воздействию космической радиации полупроводниковые и оптические материалы, в меньшей степени - полимерные материалы, самую высокую стойкость к воздействию радиации имеют металлы.

В интегральных микросхемах при облучении существенно изменяются характеристики вследствие изменения параметров входящих в них резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов. Так же изменяются изолирующие свойства разделительных *p-n*-переходов, возрастают токи утечки, появляются многочисленные паразитные связи между элементами структуры микросхем, что в результате приводит к нарушению их функционирования.

В современных интегральных схемах с высокой степенью интеграции электрические заряды, управляющие их работой, оказались сопоставимыми с зарядами, образующимися в материале микросхемы при прохождении тяжёлых ядер галактических космических лучей или высокоэнергетических протонов радиационных поясов Земли. Эти внесённые электрические заряды при перемещении их в электрических полях внутри микросхемы и приводят к возникновению сбоев.

При проектировании РЭС стойких к радиационным воздействиям целесообразно учитывать данные о стойкости к ним используемых электрорадиоэлементов.

При разработке РЭС космических аппаратов используются новые стойкие материалы, способные выдерживать нагрузки космических полётов (высокие температуры и давление, вибрационные нагрузки на этапе выведения, низкие температуры космического пространства, глубокий вакуум, радиационное воздействие, микрочастицы и т.д.) и иметь достаточно низкую удельную массу. В качестве конструкционных материалов несущих конструкций РЭС чаще всего используются лёгкие металлы и сплавы и различные композиционные материалы. Например, магниевые сплавы не только являются самым лёгким конструкционным металлом, но и остаются единственным конкурентом конструкционных пластмасс, а также конкурентом алюминиевых среднепрочных сплавов по весовым характеристикам, имея перед ними существенные преимущества:

- высокие удельные прочность и жёсткость, хорошие усталостные свойства;
- стабильность механических свойств и размеров при длительном хранении благодаря отсутствию способности естественно стариться;
- способность работать в широком диапазоне температур: от криогенных (-70 .. -196°С) температур до высоких (кратковременно до 300 .. 350°С, длительно - до 200 .. 250°С);

- высокая демпфирующая способность, хорошее тепловое и противозумное экранирование и др.

Принципиально возможны три варианта защиты РЭС от радиационного излучения [36]:

- **Общая экранировка.** Обеспечивает эффективную защиту, однако увеличивает общую массу и габаритные размеры защитного устройства в целом.
- **Теневая экранировка.** Позволяет уменьшить массу и габаритные размеры, если известно направление потока излучения с определёнными характеристиками (Рис. 2.15).

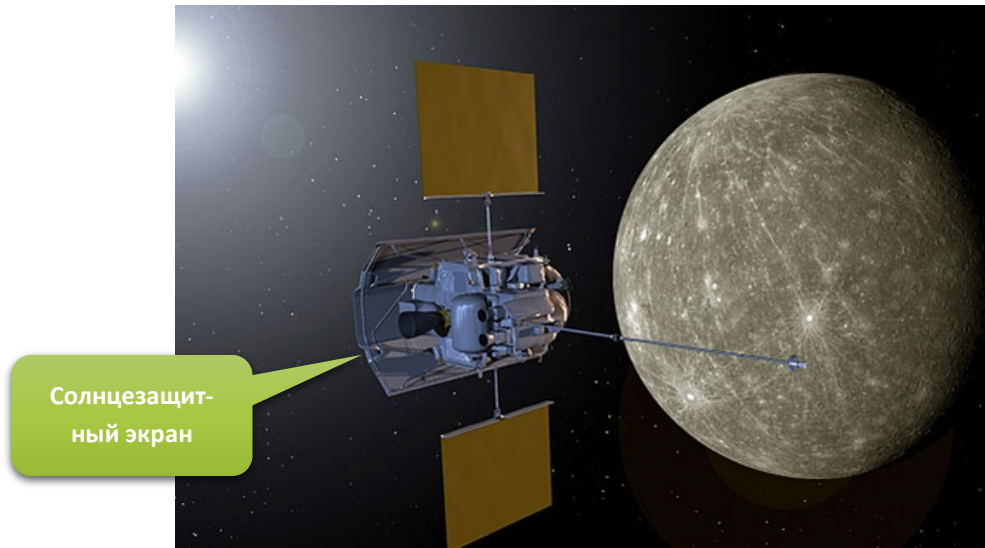


Рис. 2.15 - Космическая станция «Мессенджер». Солнце около Меркурия в 11 раз ярче, чем на околоземной орбите, и температура нагрева корпуса аппарата может достигать 450°C, но благодаря защитному теплоизоляционному щиту, температура эксплуатации Мессенджера находится в пределах комнатной.

- **Локальная защита.** Обеспечивает минимальные массогабаритные характеристики её устройств, однако для её использования необходимо располагать достаточно подробными данными о стойкости защищаемых РЭС и их составных частей.

● **Воздействие на РЭС электромагнитных импульсов (ЭМИ) высокой интенсивности.** Источниками ЭМИ являются многочисленные электромагнитные факторы естественного и искусственного происхождения: разряды молний и статического электричества, излучения радиолокационных и радиопередающих средств (РЛС и РПС), короткие замыкания в энергетическом оборудовании, в ЛЭП и т.п., стойкость к воздействию которых предусматривается в процессе проектирования современных РЭС [37].

Успехи в создании эффективных источников энергии и развитие новых методов генерирования мощных ЭМИ, имеющих высокую скорость нарастания и большую длительность, привели к созданию в США и России нового электромагнитного оружия (ЭМО), которое предназначено прежде всего для вывода из строя РЭС путём воздействия на уязвимые части РЭС электромагнитными импульсами. Доступность ЭМО или их составных частей на рынке вооружения приведёт к криминальному применению этих средств в процессе конкурентных "разборок", террористических проявлений отдельных групп лиц.

Воздействие электромагнитного оружия вызывает в цепях РЭС импульсы напряжений от 100 до 10000 В, массовые искрения оболочек кабелей на корпус аппаратуры и землю, пробой в разъёмах и воздушных промежутках между составными частями конструкции РЭС. Поражающее свойство ЭМО усиливается в несколько раз при неправильном проектировании РЭС: использовании внешних электромагнитных экранов с острыми углами, выступающих частей и локальных неоднородностей, нерациональной разводки внешних кабелей, внутренних цепей, систем заземления.

Защита РЭС от воздействия электромагнитного оружия выполняется методами рационального конструирования с использованием известных методов экранирования, ограничением уровней помех в цепях, применением различных систем заземлений и т.п. Для защиты РЭС от воздействий ЭМИ и разрядов молний может быть применено устройство экранирования аппаратуры с нелинейными свойствами – пропускающими слабый сигнал и экранирующий ЭМП высокой интенсивности (А.С. N 999185 от 20.03.81 г.). С этой же целью для повышения эффективности экранирования от ЭМИ разрабатываются также композиционные материалы с внутренним барьерным слоем, обладающим нелинейными свойствами.

#### 2.1.6 Анализ механических воздействий

В процессе транспортирования и эксплуатации РЭС подвергается воздействию **внешних механических воздействий** (ударов, вибраций, линейных ускорений), возникающих из-за наличия неуравновешенных подвижных масс при передвижении по дорогам, при посадках самолётов и вертолётов, вибраций движущихся частей двигателей, при стрельбе из оружия, изменении скорости движения, падениях, при аэродинамических и гидродинамических воздействиях окружающей среды (ветер, волны, снежные лавины, землетрясения, обвалы) и т.д.

Значительные внешние механические воздействия могут вызвать существенное усложнение конструкции РЭС, так как в их элементах возникают статические и динамические деформации. Это способствует порче как отдельных частей конструкции, так и конструкции РЭС в целом (даже полного её разрушения).

Повышенные деформации могут нарушить нормальную работу РЭС задолго до возникновения опасных для прочности напряжений (порча резьбовых соединений, паек выводов, сварки, обрыв печатных проводников, нарушение изоляции кабелей, смещение ЭРЭ и т. д.). Из-за механических воздействий возможно нарушение герметичности РЭС из-за разрушения паяных, сварных и клеевых швов и появления трещин в металлостеклянных спаях.

Механические воздействия могут проявляться как на месте установки РЭС, так и при их транспортировании. Устранение влияния первой группы механических воздействий обеспечивается конструкцией РЭС, а второй – ещё и рациональным проектированием упаковки.

**Характеристика механических воздействий.** На любой элемент конструкции, представляющей собой колебательную систему, имеющую сосредоточенную и распределённую нагрузку и определённый вид закрепления концов, действует сила

$$F = m \cdot a$$

где  $m$  - масса элемента конструкции;  $a$  - ускорение.

Характер и интенсивность возможных механических воздействий оценивают степенями **жёсткости**<sup>6</sup>, оговорёнными в [3,38] (см. Таблица 2.9). Особенно большое значение имеет жёсткость для авиационных, ракетных и других РЭС, при проектировании которых надлежит обеспечивать минимальные массогабаритные показатели. Стараясь облегчить конструкцию и максимально использовать прочностные свойства материалов, конструктор вынужден повышать напряжения, что приводит к увеличению деформаций.

**Удары** возникают при резком изменении ускорения и характеризуются количественно ускорением (от десятков до тысяч  $g^7$ ), длительностью (от долей до десятков миллисекунд) и числом ударов (одиночные и многократные удары). При ударах возможно разрушение деталей и узлов в местах крепления.

**Линейные ускорения** действуют на РЭС, размещённые на подвижных объектах (автомобилях, самолётах, ракетах и т.п.), движущихся с ускорением (например, при разгоне и торможении), а также при движении по криволинейной траектории (центробежное ускорение). Линейные ускорения характеризуются ускорением в единицах  $g$  и длительностью воздействия.

Отношение силы  $F$ , появляющееся в результате воздействия ускорения, к силе тяжести  $P$  называют перегрузкой:

$$G = F/P.$$

Значение перегрузки  $G$  показывает, во сколько раз дополнительная сила  $F$  больше силы тяжести  $P$ , действующей на РЭС. Если известна перегрузка, то появляющаяся при этом сила может быть вычислена по формуле:

$$F = P \cdot G.$$

В общем случае каждый элемент конструкции РЭС представляет собой колебательную систему, имеющую сосредоточенную и распределённую нагрузку. Эта система колеблется относительно точек крепления.

**Вибрации** представляют собой механические колебания, характеризующиеся диапазоном частот и величиной ускорения (в единицах  $g$ ). Свойство РЭС противодействовать их влиянию характеризуется **вибропрочностью** (способностью конструкции РЭС противостоять разрушающему воздействию вибрации в нерабочем состоянии и продолжать нормально работать после включения и снятия вибрационных нагрузок) и **виброустойчивостью** (способностью РЭС выполнять заданные функции во включённом состоянии в условиях воздействия вибраций.). **Вибропрочное** и **ударопрочное** РЭС должно противостоять разрушающему действию длительной вибрации в заданном диапазоне частот и ускорений, а также действию ударов заданной силы и длительности и способно после этого нормально выполнять свои функции.

---

<sup>6</sup> **Жёсткость** – способность РЭС сопротивляться действию внешних нагрузок с деформациями, допустимыми без нарушения работоспособности.

<sup>7</sup>  $g$  - ускорение свободного падения на поверхности Земли. Стандартным («средним») значением считается  $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ .

**Акустический шум.** На РЭС, размещаемые поблизости от работающих двигателей ракет, самолётов, кораблей, автомобилей и железнодорожного транспорта, немаловажное влияние может оказывать **акустический шум**, который характеризуется спектром звуковых частот, давлением звука, мощностью колебаний источника звука, силой звука.

Если на аппарат воздействует синусоидальная вибрация, то перегрузка

$$G \approx 0.004 \cdot A \cdot f^2,$$

где  $A$  - амплитуда вибрации, мм;  $f$  - частота вибрации, Гц.

Особенно опасен механический **резонанс**, когда частота вынуждающего колебания совпадает с частотой собственных механических колебаний конструкции РЭС или отдельных её элементов. При эксплуатации РЭС на подвижных транспортных средствах внешние вибрации могут вызвать резонансные колебания, усиливающие механические нагрузки в несколько раз, что может вызвать отказы в работе и даже полное разрушение РЭС из-за взаимного перемещения отдельных элементов конструкции.

Заметим, что акустический шум заставляет вибрировать в равной степени практически все элементы конструкции, в то время как ударные и вибрационные нагрузки воздействуют на элементы конструкции РЭС *через их точки крепления*. В результате этого действенность влияния ударных и вибрационных нагрузок зависит от положения точек крепления элементов конструкции относительно направления их воздействия. Таким образом, результат действия акустического шума часто может быть даже более разрушительным, чем действие ударных и вибрационных нагрузок.

**Основными конструкторскими методами защиты конструкции РЭС от заданных механических воздействий** является выбор оптимальных конструкторских решений. Так, причиной сбоев и отказов в работе РЭС подвижных объектов может быть неправильный выбор несущих конструкций [1]: отсутствие амортизаторов, дополнительных элементов крепления, недостаточная жёсткость и т.п. Необходимо установить вид конструкции: моноблочное исполнение или в составе стоек, шкафов и т.д. Нужно найти способы повышения жёсткости элементов конструкции, а также подобрать материалы с соответствующей прочностью и жёсткостью.

Для обеспечения надёжной работы РЭС в условиях механических воздействий, необходимо продумать и выбрать правильную ориентацию элементов на печатной плате (с учётом ориентации платы в блоке), способы дополнительного крепления ЭРЭ, материалы основания, габариты печатной платы и т.д.

Для разрабатываемой РЭС непременно должно быть выявлено оптимальное место расположения и надёжная конструкция элементов крепления, определены способы предохранения крепёжных изделий от самоотвинчивания.

Важнейшей мерой защиты конструкции РЭС от вибрации, ударов и ускорений является применение (при необходимости) амортизаторов – демпферов [39]. При этом следует выбрать тип амортизаторов, их количество и схему размещения (Рис. 2.16). Для подтверждения работоспособности подобных конструкций необходим расчёт динамики [39], в ходе которого надлежит обеспечить такие их резонансные характеристики, при которых в заданный диапазон рабочих частот корпуса РЭС не попадали бы резонансные частоты элементов конструкции.



Рис. 2.16 - Демпферы для РЭС: а) - ножки; б) - амортизаторы

● **Стационарные РЭС.** Особенности:

- их работа происходит в помещениях с нормальными климатическими условиями;
- незначительные механические перегрузки во время работы;
- ограничения на габариты и массу любой части РЭС, определяемые удобством транспортирования, выгрузки, передвижения внутри помещения и т.п.

Обычным источником вибраций для стационарных РЭС являются внутренние источники: вентиляторы, мощные преобразователи напряжения, вращающиеся антенные устройства и т.п. В первую очередь при разработке конструкции стационарных РЭС следует выделить источники вибрации и элементы, чувствительные к ним, чтобы затем принять компетентные решения при компоновке. Наиболее лёгкие режимы работы у стационарных РЭС группы **С1** (см. Таблица 2.8), эксплуатируемых в отапливаемых помещениях, и это упрощает их конструкцию.

Таблица 2.15 представляет типовые параметры эксплуатационных воздействий на стационарную сухопутную аппаратуру подвижной радиосвязи групп **С1** и **С2**.

Таблица 2.15 - Параметры эксплуатационных воздействий на стационарную сухопутную аппаратуру подвижной радиосвязи [3]

Воздействующий фактор	Характеристика воздействующего фактора	Значение воздействующего фактора для групп РЭС	
		С1	С2
1. Синусоидальная вибрация	Диапазон частот, Гц	10 ... 70	
	Амплитуда ускорения, м/с <sup>2</sup> (g)	19,6 (2)	



		Длительность вибраций, мин	90	
2. Механические удары при транспортировании		Пиковое ударное ускорение, м/с <sup>2</sup> (g)	147 (15)	
		Длительность удара, мс	6	
		Число ударов в каждом направлении	4000	
3. Пониженная температура для исполнения по степени жёсткости (см. 2.1.2)	1	Рабочая температура, °С	+5	-25
		Предельная температура, °С	-40	
		Время выдержки при каждой температуре, час	2	
	2	Рабочая температура, °С	+5	-40
		Предельная температура, °С	-55	
		Время выдержки при каждой температуре, час	2	
4. Повышенная температура		Рабочая температура, °С	+40	+55
		Предельная температура, °С	+55	
5. Изменение температуры для исполнения по степени жёсткости (число циклов – 3, время выдержки в камере)	1	Диапазон изменения температуры, °С	-	-40 ... +55
	2	Диапазон изменения температур °С	-	-55 ... +55
6. Пониженное атмосферное давление (время выдержки в камере – не менее 1 час)		Атмосферное давление, кПа	55	
7. Влажность при повышенной температуре в постоянном режиме для исполнения по степени жёст-	1	Относительная влажность, %	-	93
		Температура, °С	-	25
	2	Относительная влажность, %	-	93
		Температура, °С	-	40
8. Соляной туман*		Длительность воздействия соляного тумана, ч	2	
9. Пыль и песок*		Соотношение песка и пыли	-	1:1
		Длительность воздействия, час	-	1
		Температура, °С	-	35
10. Иней и роса*		Температура, °С	-	-25
		Длительность воздействия, час	-	2
Примечание. Знак «-» означает, что требования не предъявляются, знак «*» - требования предъявляются, если они установлены в ТУ на аппаратуру конкретного назначения				

● **РЭС для подвижных объектов.** При конструировании РЭС для подвижных объектов (мобильные связные, радиолокационные и пеленгаторные станции, диспетчерские станции различных предприятий, железнодорожный транспорт, передвижные телевизионные студии, автомобильные приёмники и навигаторы и т.д.) следует предусмотреть:

– предохранение от сильного запыления и абразивного воздействия частиц песка и пыли;

- защиту от действия избыточной влажности;
- повышенную защиту от вибраций и ударов, включая необходимость работы в условиях механических воздействий.
- возможность лёгкого расчленения на части с целью погрузки и разгрузки силами двух человек.

При разработке конструкции РЭС, размещаемой на движущемся транспорте важно определить направления, по которым воздействуют механические нагрузки, что позволяет выработать рекомендации по компоновке РЭС.

Для возимой сухопутной аппаратуры, размещаемой на автомобильном и железнодорожном транспорте, направление вибраций чаще всего вертикальное, а ударов и ускорений - в направлении движения. Для корабельных РЭС главное направление практически всех видов механических воздействий - горизонтальное, а для ударных - и вертикальное. Для авиационных РЭС направление вибраций и ударов при движении по земле, как правило, вертикальное, в полете для всех механических воздействий - горизонтальное.

Таблица 2.16 представляет типовые параметры эксплуатационных воздействий для возимых РЭС групп **В3 – В5** (см. Таблица 2.8).

Таблица 2.16 – Типовые параметры эксплуатационных воздействий *на возимую сухопутную аппаратуру подвижной радиосвязи* [3]

Воздействующий фактор		Характеристика воздействующего фактора	Значение воздействующего фактора для аппаратуры		
			В3	В4	В5
<b>1. Синусоидальная вибрация</b>		Диапазон частот, Гц	10 .. 70		10 .. 100
		Амплитуда ускорения, м/с <sup>2</sup>	19,6	39,2	
<b>2. Механические удары</b>	При эксплуатации	Пиковое ударное ускорение, м/с <sup>2</sup> (g)	98 (10)	147 (15)	250 (25)
		Длительность удара, мс	16	10	6
		Число ударов в каждом направлении	1000		
	При транспортировании	Пиковое ударное ускорение, м/с <sup>2</sup> (g)	250 (25)		
		Длительность удара, мс	6		
		Число ударов в каждом направлении	4000		
<b>3. Пониженная температура для исполнения по степени жёсткости</b>	1	Рабочая температура, °С	-10	-25	
		Предельная температура, °С	-40		
	2	Рабочая температура, °С	-10	-40	
		Предельная температура, °С	-55		
<b>4. Повышенная температура</b>	Рабочая температура, °С		+55		
	Предельная температура, °С		+55	+65	
<b>5. Изменение температуры для исполнения по степени жёсткости</b>	1	Диапазон изменения температуры, °С	-40 .. +55	-40 .. +65	-40 .. +55
	2	Диапазон изменения температур, °С	-55 .. +55	-55 .. +65	-55 .. +55

<b>6. Пониженное атмосферное давление*</b>	Атмосферное давление, кПа		55		
<b>7. Влажность при повышенной температуре в постоянном режиме для исполнения по сте-</b>	1	Относительная влажность, %	93		
		Температура, °С	25		
	2	Относительная влажность, %	93		
		Температура, °С	40		
<b>8. Соляной туман*</b>	Длительность воздействия соляного тумана, час		2		
<b>9. Пыль и песок*</b>	Соотношение песка и пыли		-	1:1	-
	Длительность воздействия, час		-	1	-
	Температура, °С		-	35	-
<b>10. Атмосферные выпадаемые осадки (дождь)*</b>	Интенсивность дождя, мм/мин		3		
	Длительность воздействия, мин		10		
<b>11. Иней и роса*</b>	Температура, °С		-25		
	Длительность воздействия, час		2		
Примечание. Знак «-» означает, что требования не предъявляются, знак «*» - требования предъявляются, если они установлены в ТУ на аппаратуру конкретного назначения					

● **Носимые РЭС.** Носимые (портативные) РЭС (приёмная и радиопередающая аппаратура, телефоны, небольшие измерительные и медицинские приборы и т.п.) характеризуются размещением их на человеке и необходимостью защиты от случайных значительных ударов, неизбежных в полевых условиях. Физические возможности одного человека позволяют носить продолжительное время за плечами 10 кг, на ремне через плечо 3 кг, в кармане 0,7 кг.

Для носимых РЭС, присуща высокая зависимость конструкции от габаритов и массы источников питания. Кроме общих климатических требований, при работе носимой РЭС добавляются усложнённые условия в холодное время года, связанные с конденсацией росы в результате отпотевания при внесении с холодного воздуха в тёплое помещение, поэтому носимое РЭС для полевых условий обычно выполняют в герметичном корпусе. Таким образом, носимые РЭС должны иметь малые габариты, незначительную мощность потребления, высокую надёжность и сравнительно небольшую стоимость.

Таблица 2.17 знакомит с типовыми параметрами эксплуатационных воздействий для носимых РЭС групп **Н6, Н7** (см. Таблица 2.8).

Таблица 2.17 – Типовые параметры эксплуатационных воздействий *на носимую сухопутную аппаратуру подвижной радиосвязи* [3]

Воздействующий фактор	Характеристика воздействующего фактора	Значение воздействующего фактора для групп РЭС	
		Н6	Н7
<b>1. Синусоидальная вибрация</b>	Диапазон частот, Гц	10 .. 70	
	Амплитуда ускорения, м/с <sup>2</sup>	39,2	19,6
<b>2. Механические удары</b>	При	Пиковое ударное ускорение, м/с <sup>2</sup> (g)	
		98 (10)	

	эксплуатации	Длительность удара, мс	16	
		Число ударов в каждом направлении	1000	
<b>2. Механические удары</b>	При транспортировании	Пиковое ударное ускорение, м/с <sup>2</sup> (g)	250 (25)	
		Длительность удара, мс	6	
		Число ударов в каждом направлении	4000	
<b>3. Свободное падение</b>	Высота падения, мм, при	до 2	1000	
		до 5	500	
		до 10	-	250
<b>4. Пониженная температура для исполнения по степени жёсткости</b>	1	Рабочая температура, °С	+5	-10
		Предельная температура, °С	-40	
	2	Рабочая температура, °С	-10	-25
		Предельная температура, °С	-55	
<b>5. Повышенная температура</b>		Рабочая температура, °С	+40	+50
		Предельная температура, °С	+55	
<b>6. Изменение температуры для исполнения по степени жёсткости</b>	1	Диапазон изменения температур, °С	-40 .. +55	
	2	Диапазон изменения температур, °С	-55 .. +55	
<b>7. Пониженное атмосферное давление*</b>		Атмосферное давление, кПа	55	
<b>8. Влажность при повышенной температуре в постоянном режиме для исполнения по степени жёсткости</b>	1	Относительная влажность, %	93	
		Температура, °С	25	
	2	Относительная влажность, %	93	
		Температура, °С	40	
<b>9. Соляной туман*</b>		Длительность воздействия соляного тумана, час	2	
<b>10. Пыль и песок*</b>		Соотношение песка и пыли	-	1:1
		Длительность воздействия, час	-	1
		Температура, °С	-	35
<b>11. Погружение в воду*</b>		Глубина погружения, м	0,5	0,4
		Длительность воздействия, час	1,0	0,5
<b>12. Атмосферные выпадаемые осадки (дождь)*</b>		Интенсивность дождя, мм/мин	3	
		Длительность воздействия, мин	10	
<b>13. Иней и роса*</b>		Температура, °С	-25	
		Длительность воздействия, час	2	
Примечание. Знак «-» означает, что требования не предъявляются, знак «*» - требования предъявляются, если они установлены в ТУ на аппаратуру конкретного назначе-				

● **Бортовые РЭС.** В очень жёстких условиях обыкновенно работают бортовые авиационные и космические РЭС (Таблица 2.18). Специфическими особенностями таких

РЭС являются действие на них совокупности жёстких внешних факторов (быстрая смена температур и вибраций, аэродинамических и радиационных воздействий в широком диапазоне), которые действуют одновременно, что приводит к отказам системного характера.

Таблица 2.18 - Типовые параметры эксплуатационных воздействий бортовых РЭС

Воздействующий фактор		Авиационная	Аварийная	Ракетная		Космическая
				большая	малая	
<b>Вибрации:</b>	<b>диапазон частот, Гц</b>	5 .. 2000	10 .. 70	10 .. 3000	50 .. 5000	1,5 .. 2500
	<b>перегрузки, м/с</b>	0,15 .. 25		до 400	до 300	
<b>Удары:</b>	<b>длительность, мс</b>	15		10...12	10...12	-
	<b>число ударов</b>	18	500			
	<b>перегрузки, м/с</b>	50 .. 300	750	500	1000	
<b>Линейное ускорение, м/с</b>		до 50		50 .. 150	300...500	до 150
<b>Диапазон акустических воздействий, Гц</b>		50.. .10000	-	50 .. 10000		-
<b>Звуковое давление, дБ (Вт/м<sup>2</sup>)</b>		до 170 (10 <sup>5</sup> )		до 200 (10 <sup>8</sup> )	до 190 (10 <sup>7</sup> )	до 190 (10 <sup>7</sup> )
<b>Диапазон температур, °С</b>		-70 .. +295	-70 .. +35	-65 .. +165		-
<b>Пониженное давление, х10 Па</b>		2 .. 100		0,13 .. 100		

Очевидно, что при проектировании бортовых РЭС из экономических соображений необходимо стремиться к минимизации их габаритов и массы.

Значительная часть бортовых РЭС (в том числе и космических) работает в условиях разреженной атмосферы – вне герметичного отсека. Температура летательных аппаратов изменяется в широких пределах (см. табл. 2.7). Это приводит к тепловым ударам, что крайне неблагоприятно сказывается на работе бортовых РЭС и их надёжности.

Успех космических и авиационных полётов во многом определяются безотказностью работы РЭС. Практически любые затраты на повышение показателей надёжности будут оправданы, если это связано с жизнью людей. Нередко восстановление бортовых РЭС в процессе эксплуатации практически нереально, так как они контролируются, диагностируются и ремонтируются только в специализированных предприятиях. Поэтому многие бортовые РЭС должны иметь резервирование. Резервирование может включаться как автоматически, так и экипажем.

Специальные требования предъявляются к РЭС космической технике:

- эта аппаратура необслуживаемая, а эксплуатироваться должна несколько лет;
- в контейнере космического аппарата размещены множество разнообразных РЭС, что требует решения острой проблемы обеспечения электромагнитной совместимости;
- значительная цикличность изменения температуры приводит к тепловым ударам;
- велика опасность воздействия радиации;

- аппаратура работает в вакууме или в условиях атмосферы с постоянным газовым составом низкой влажности;
- аппаратура работает в условиях невесомости (отсутствует естественная конвекция);
- большие механические нагрузки во время старта и практически полное их отсутствие во время работы.

Таким образом, при конструировании бортовых РЭС важно обеспечить повышенную надёжность, высокую контролепригодность<sup>8</sup>, а если возможно присутствие человека, то и быструю техническую диагностику, лёгкость узлов РЭС и возможность ремонта с использованием типовых элементов замены<sup>9</sup>.

● **Особенности эксплуатации морских РЭС.** Морская среда, окружающая судно, является постоянно действующим фактором, активизирующим разрушительные физико-химические процессы, протекающие при воздействии влаги на металлические и изоляционные материалы, входящие в состав РЭС. Основные проблемы связаны с комплексным воздействием климатических и механических факторов: 100% -я влажность при повышенной температуре и солевом тумане в сочетании с непрерывной вибрацией от двигателей и прочих механизмов, ударными перегрузками и линейными ускорениями от волн и качки. Во время штормов и в аварийных ситуациях возможно прямое воздействие воды, и на этот случай должна обеспечиваться водозащищённость и брызгозащищённость.

При разработке РЭС, устанавливаемых на морских судах (особенно в тропическом исполнении) необходимо предусматривать коррозионную стойкость и плеснеустойкость.

Длительное автономное плавание с отрывом от ремонтных баз обязывает предусмотреть возможность ремонта РЭС без захода на ремонтную базу на месте установки при минимальном количестве персонала и ограниченных контрольно-измерительных и ремонтных средствах.

На военных судах, имеющих ракетное, торпедное или артиллерийское вооружение, надлежит предусмотреть защиту от ударов и ускорений, возникающих при стрельбе. Кроме того следует позаботиться о защите разрабатываемых РЭС от сильных акустических, электромагнитных и радиационных воздействий, возникающих вследствие работы бесчисленных видов РЭС, а также работы гидроакустических станций.

При размещении судовых и корабельных РЭС одной из самых сложных задач является обеспечение электромагнитной совместимости [40].

Радиолокационные установки, устройства передачи сигналов бедствия и т.п. должны сохранять работоспособность в случае повреждения самого судна или корабля в результате столкновения или других аварийных ситуаций.

---

<sup>8</sup> **Контролепригодность** - свойство объекта, характеризующее его пригодность к проведению диагностирования (контроля) заданными средствами диагностирования (по ГОСТ 20911-89).

<sup>9</sup> **Типовой элемент замены (ТЭЗ)** - модуль, который может быть заменён обслуживающим персоналом непосредственно в условиях эксплуатации, т.е. без использования каких-либо специальных и контрольно-измерительных средств.

● **Бытовые РЭС.** Условия эксплуатации бытовых РЭС считаются наиболее лёгкими, так как бытовые РЭС менее других подвержены механическим и климатическим воздействиям. Бытовые РЭС характеризуются:

- возможностью эксплуатации абсолютно неподготовленным человеком;
- повышенными требованиями к безопасности эксплуатации;
- улучшенной эстетикой внешнего вида, удобством размещения;
- повышенными аудио и видео параметрами;
- определяющим значением стоимости;
- массовостью производства и, следовательно, высокой технологичностью.

По условиям эксплуатации бытовая радиоэлектронная аппаратура [41] подразделяется на четыре группы (Таблица 2.19).

Таблица 2.19 - Группы бытовых РЭС по условиям эксплуатации

Группа РЭС	Условия эксплуатации	Категория исполнения по ГОСТ 15150-69
<b>I</b>	В жилых помещениях	4.2
<b>II</b>	В транспортных средствах (встроенная)	2.1
<b>III</b>	На открытом воздухе, не рассчитанная для работы в условиях движения	1.1
<b>IV</b>	На открытом воздухе, в том числе в условиях движения (на ходу, в салоне автомобиля, катера и т. п.)	

Таблица 2.20 знакомит с нормами климатических и механических воздействий для бытовых РЭС, устанавливаемые ГОСТ 11478-88 [41].

Таблица 2.20 – Типовые нормы климатических и механических воздействий для бытовой радиоэлектронной аппаратуры

Параметры		I группа	II группа	III и IV группы
<b>Отсутствие резонансов:</b>	диапазон частот $f$ , Гц	-	10 .. 55	-
	амплитуда, мм	-	0,15	-
<b>Устойчивость к синусоидальным вибрациям:</b>	диапазон частот $f$ , Гц	-	10 .. 150	-
	амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup>	-	19,6	-
<b>Прочность при синусоидальных вибрациях:</b>	диапазон частот $f$ , Гц	10 .. 150	10 .. 150	10 .. 150
	амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup>	19,6	19,6	19,6
<b>Прочность при механических ударах:</b>	длительность $X_u$ , мс	-	16	11
	частота следования $f$ , мин <sup>-1</sup>	-	60 .. 120	-
	амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup>	-	98	147
<b>Устойчивость к механическим ударам:</b>	длительность $X_u$ , мс	-	16	11
	частота следования $f$ , мин <sup>-1</sup>	-	60 .. 120	-
	амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup>	-	98	147

Параметры		I группа	II группа	III и IV группы
Прочность при транспортировании:	длительность $X_{т}$ , мс	11	11	11
	частота следования $f$ , мин <sup>-1</sup>	60 .. 120	60 .. 120	60 .. 120
	амплитуда $a$ , м/с <sup>2</sup>	147	147	147
Воздействие температуры:	пониженной, °С	-40	-40	-40
	повышенной, °С	55	55	55
Воздействие пониженного атмосферного давления $p$ :	кПа	70	70	70
	мм рт. ст.	525	525	525
Воздействие воздушно-пылевого потока:	скорость $v$ , м/с	0,5 .. 1	0,5 .. 1	0,5 .. 1
Воздействие повышенной влажности:	относительная влажность, %	-	-	93
	при температуре, °С	-	-	25
Воздействие соляного (морского) тумана:		Нет	Нет	Есть

Таблица 2.21 характеризует необходимую прочность бытовых РЭС всех групп исполнения при их испытании на падение с определённой высоты.

Таблица 2.21 – Зависимость допустимой высоты падения бытовых РЭС от их массы

Масса изделия, кг	Высота падения, мм
до 2.0	1000
3.0 .. 5.0	500
5.0 .. 10.0	250
10.0 .. 50.0	100
более 50	50

### 2.1.7 Анализ безопасности эксплуатации

В конструкции РЭС должны быть предусмотрены специальные меры по технике безопасности, исключающие возможность несчастных случаев.

При эксплуатации РЭС имеют место следующие факторы опасности и вредности для здоровья оператора.

- Опасность поражения электрическим током.
- Большой уровень тепловых излучений и высокие температуры в зоне эксплуатации.
- Шум от работы систем и устройств управления ЭС (например, система вентиляции).
- Вибрации при работе систем и устройств управления, а так же от объекта назначения.
- Электромагнитные излучения, превышающие допустимый уровень.

В ЭС имеют место **опасности поражения оператора** электрическим током, если в ЭС присутствуют электрические напряжения 36 В и более.



В настоящее время существует несколько общепризнанных стандартов, которые используют западные (а в наше время и отечественные) производители для характеристики степени защиты от внешних воздействий на электрооборудование.

**Система классификации IP** (англ. *Ingress Protection - Защита от проникновения посторонних сред*) указывает степень защиты, обеспечиваемой корпусом (оболочкой). Она рекомендована в стандарте МЭК 60529 (аутентичный текст ГОСТ 14254-96 [42]) ведущей Международной Электротехнической комиссией (англ. *IEC - International Electrotechnical Commission*) и применяется в большинстве стран мира.







Показатель **IP** означает степень защиты, обеспечиваемой оболочкой от проникновения твёрдых предметов (включая защиту людей от доступа к опасным частям изделий и защиту электрооборудования внутри оболочки от попадания посторонних твёрдых предметов) и от проникновения воды (защиту электрооборудования внутри оболочки от вредных воздействий в результате проникновения воды). Кроме того стандарт ГОСТ 14254-96 устанавливает методы и режимы контроля и испытаний для проверки оболочек электрооборудования на соответствие установленной степени защиты.









Требования в части стойкости оболочек и электрооборудования в целом к другим внешним воздействующим факторам, кроме внешних твёрдых предметов и воды, а также защиты от соприкосновения с опасными движущимися частями, расположенными вне оболочки, устанавливают по другим соответствующим стандартам.

Структура кода: **IPXXAA**, где **XX** – две цифры (присутствуют всегда), **AA** – две латинские буквы (могут отсутствовать). Первая цифра кода **IP** показывает степень защиты персонала от соприкосновения с находящимися под напряжением частями и от соприкосновения с движущимися частями, расположенными внутри оболочки. Вторая цифра кода **IP** показывает степень защиты от проникновения влаги.

Таблица 2.22 представляет значения цифр кода **IP**.

Таблица 2.22 - Значения цифр кода **IP** по ГОСТ 14254-96 (МЭК 60529)

Первая цифра кода	Защита от механических повреждений	Вторая цифра кода	Степень защиты оборудования от попадания влаги
<b>0</b>	Защита отсутствует.	<b>0</b>	Защита отсутствует.
<b>1</b> 	Защита от проникновения крупных инородных тел диаметром более 50 мм, а также от прикосновения больших поверхностей тела (например, рук). Защиты от сознательного контакта нет	<b>1</b> 	Защита от капель воды. Капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредное воздействие на изделие.
<b>2</b> 	Защита от проникновения внутрь оболочки к токоведущим и движущимся частям пальцев или предметов длиной более 80 мм и от проникновения твёрдых тел размером свыше 12 мм.	<b>2</b> 	Защита от капель воды, падающих на оболочку при наклоне 15°. Капли не должны оказывать вредное воздействие на изделие.
<b>3</b> 	Защита от проникновения внутрь оболочки к токоведущим и движущимся частям инструментов, проволоки и т.д. диаметром или толщиной более 2,5 мм	<b>3</b> 	Защита от дождя. Дождь, падающий на оболочку под углом 60° от вертикали, не дол-

	и от проникновения твёрдых тел размером более 2,5 мм. Инструменты, кабели и т. п.		жен оказывать вредного воздействия на изделие, находящееся под оболочкой.
<b>4</b> 	Защита от проникновения внутрь оболочки к токоведущим и движущимся частям проволоки и других предметов толщиной более 1 мм и от проникновения твёрдых тел размером более 1 мм. Большинство проводов, болты и т. п.	<b>4</b> 	Защита от брызг, падающих под любым углом. Брызги не должны оказывать вредного воздействия на изделие, находящееся под оболочкой.
<b>5</b> 	Полная защита персонала от случайного соприкосновения с токоведущими и движущимися частями, находящимися под оболочкой; пылезащищённое исполнение - проникновение пыли внутрь не предотвращено полностью, однако пыль не может проникать в количестве достаточном для нарушения работы изделия.	<b>5</b> 	Защита от водяных струй. Струя воды, которая выбрасывается в любом направлении на оболочку, не должна оказывать вредного воздействия на изделие.
<b>6</b> 	Полная защита персонала от случайного соприкосновения с токоведущими и движущимися частями и полная защита от проникновения пыли (пыленепроницаемое исполнение).	<b>6</b> 	Защита от воздействий, характерных для палубы корабля (включая палубное водонепроницаемое оборудование).
	Не предусмотрена	<b>7</b> 	Защита при погружении в воду. Вода не должна проникать в оболочку, погружённую в воду, при определённых условиях давления и времени в количестве, достаточном для повреждения изделия.
	Не предусмотрена	<b>8</b> 	Защита при длительном погружении в воду. Изделия пригодны для длительного погружения в воду при условиях, установленных изготовителем.

Например класс защиты *IP65* - Полная защита от пыли, защита от водяных струй в любом направлении.

Нередко защита от попадания жидкостей автоматически обеспечивает и защиту от проникновения. Например, устройство, имеющее защиту от жидкости на уровне 4 (прямое разбрызгивание) автоматически будет иметь защиту от попадания посторонних предметов на уровне 5.

Таблица 2.23 знакомит с возможными значениями дополнительных букв в конце кода *IP*.

Таблица 2.23 - Возможные значения букв в конце кода *IP*

Первая дополнительная буква указывает возможность проникновения к опасным частям прибора различными предметами		Вторая буква используется для сообщения дополнительной информации	
<b>A</b>	тыльной стороной руки	<b>H</b>	Высоковольтная аппаратура
<b>B</b>	пальцем	<b>M</b>	Во время испытаний защиты от воды устройство движется
<b>C</b>	инструментом	<b>S</b>	Во время испытаний защиты от воды устройство неподвижно
<b>D</b>	проволокой	<b>W</b>	Защита от погодных условий

Менее популярный стандарт **Национальной ассоциации производителей электрического оборудования США NEMA** (от англ. *National Electrical Manufacturer Association*) показывает, в какой среде может работать устройство [43]. Этот стандарт несколько шире рассматривает проблему защиты оборудования и используется главным образом в Соединённых Штатах и Канаде. Тем не менее, для выбора необходимого оборудования руководствоваться стандартами **NEMA** даже несколько проще.

В отличие от международного стандарта МЭК 60529, стандарт **NEMA** учитывает такие влияющие факторы, как коррозионная стойкость, стойкость к воздействию нефтепродуктов, возможность работы вне помещения и опасных местах размещения и др.

Таблица 2.24 расшифровывает некоторые классы стандарта **NEMA**.

Таблица 2.24 - Классификация защищённости корпусов электронного оборудования по стандарту **NEMA** и его примерное соответствие степеням защиты *IP*

Класс NEMA	Классификация защищённости корпусов электронного оборудования	Эквивалентный класс IP
<b>1</b>	Корпус общего назначения (шкаф, панель, бокс, коробки) общего назначения для установки только в помещении. Случайный контакт персонала с электрооборудованием исключается и обеспечивается защита от ограниченного количества грязи и слабых брызг	<b>IP20</b>
<b>2</b>	Брызгозащитный корпус, устанавливаемый в помещении. Обеспечивает достаточную защиту от небольшого количества падающей воды или грязи.	<b>IP21</b>
<b>3</b>	Корпус защищён от пыли, дождя, мокрого снега, устойчив к обледенению, устанавливается вне помещения.	<b>IP64</b>
<b>3R</b>	Водонепроницаемый корпус для работы вне помещений. Обеспечивает достаточную защиту от дождя, мокрого снега, образования	<b>IP34</b>

Класс NEMA	Классификация защищённости корпусов электронного оборудования	Эквивалентный класс IP
	наледи в условиях, когда необходимо функционирование подвижных частей.	
<b>3S</b>	Водонепроницаемый корпус для работы вне помещений, отличающийся коррозионной стойкостью и допускающий кратковременное погружение. Защищён от воздушной пыли, дождя, мокрого снега, устойчив к обледенению (в том числе и подвижные части)	<b>IP64</b>
<b>4</b>	Пылевлагодонепроницаемый корпус. Устанавливается в помещении и вне его. Обеспечивает достаточный уровень защиты от воздушной и водяной пыли, брызг и струй воды	<b>IP56, IP65, IP66</b>
<b>4X</b>	Пылевлагодонепроницаемый корпус, устойчив к коррозии. Устанавливается в помещении и вне его. Обеспечивает достаточный уровень защиты от коррозии, воздушной и водяной пыли, брызг и струй воды	<b>IP56, IP65, IP66</b>
<b>5</b>	Корпуса, предназначенные для установки в помещениях и обеспечивающие достаточный уровень защиты от пылевой взвеси, попадания грязи и каплюющей неагрессивной жидкости.	<b>IP52</b>
<b>6</b>	Корпус предназначен для использования в помещении и вне его, Защищён от пыли, воды при случайном погружении на небольшую глубину, мокрого снега, устойчив к обледенению.	<b>IP66, IP67</b>
<b>6P</b>	Корпус предназначен для использования в помещении и вне его. Защищён от пыли, воды при продолжительном погружении на небольшую глубину, мокрого снега, устойчив к обледенению.	<b>IP66, IP67</b>
<b>7, 8, 9, 10, 11</b>	Группа нормативов, регламентирующих применения оборудования для опасных зон.	
<b>12</b>	Пыле и каплезащищённые корпуса для промышленного применения в помещении. Обеспечивает достаточный уровень защиты от пыли, падения грязи и каплюющей неагрессивной жидкости.	<b>IP52</b>
<b>12K</b>	Пыле и каплезащищённые корпуса с заглушками для промышленного применения в помещении. Обеспечивает достаточный уровень защиты от пыли, падения грязи и каплюющей неагрессивной жидкости.	<b>IP52</b>
<b>13</b>	Пыле и масло-защищённые корпуса для промышленного применения в помещении. Обеспечивает достаточный уровень защиты от пыли, падения грязи и распылённой воды, нефтепродуктов, неагрессивной смазочно-охлаждающей жидкости.	<b>IP52, IP54</b>

Для многих изделий, предлагаемых на российском рынке, параметры защиты специфицируются по **военному стандарту США MIL-STD 810F/G** (англ. *Military Standard, MIL*) [44], в который входит множество разнообразных тестов, сгруппированных в методы, соответствующие тому или иному неблагоприятному фактору (воздействию). Эти методы подразделяются на процедуры, каждая из которых соответствует определённому применению - аналогично принятой в России классификации согласно стандарту ГОСТ РВ. Поэтому

нужно обязательно уточнять, каким методам и процедурам изделие соответствует стандарту **MIL-STD 810F/G** - то есть к какой группе эксплуатации в соответствии с отечественной терминологией.

Меры защиты от поражения электрическим током должны соответствовать требованиям ГОСТ 25861 и ГОСТ 12.1019. Чтобы обеспечить электробезопасность РЭС при эксплуатации необходимо:

1) Исполнить устройство с корпусом, обеспечивающим защиту оператора от прикосновения к токопроводящим частям. Так, в РЭС подключаемых к бытовым и промышленным электрическим сетям напряжением 220 или 380 / 220 В делают блокировку – при снятии крышки кожуха питание устройства должно обесточиваться.

2) Токоведущие части электронного оборудования (шины, клеммы, предохранители, открытые монтажные платы и т.п.) в необходимых случаях снабжают предупредительными надписями.

3) Если корпус металлический, то необходимо обеспечить хороший электрический контакт между всеми металлическими несущими элементами конструкции, чтобы устранить возможную разность потенциалов между ними. Для этого все металлические несущие конструкции должны соединяться между собой болтами, винтами, проводами.

4) Металлические корпуса РЭС должны иметь заземления через розетки, имеющие контакт заземления.

5) Защитное заземление изделий должно быть выполнено в соответствии с требованиями ГОСТ 12.2.007.0-75 (2001) и ГОСТ 25861-83.

6) Если устройства содержат опасные напряжения, то дополнительно следует предусмотреть сигнализацию включения высокого напряжения. Для надёжности сигнализации целесообразно применять 2 лампочки – включённого и отключённого состояния.

7) Таблица 2.25 устанавливает минимально-допустимые величины электрического сопротивления изоляции между разобшёнными токоведущими цепями, а также между токоведущими цепями и корпусом РЭС в зависимости от климатических условий.

Таблица 2.25 - Нормы сопротивления изоляции для РЭС

Климатические условия эксплуатации	Сопротивление изоляции, МОм (не менее) при рабочих напряжениях (амплитудное значение)		
	до 0.1, кВ	(0.1 .. 0.5), кВ	(0.5 .. 10.0), кВ
Нормальные	5.0	20.0	100.0
При наибольшем значении рабочей температуры	1.0	5.0	20.0
При наибольшем значении относительной влажности	0.2	1.0	2.0

**Электромагнитные излучения.** Функционирование современных РЭС сопровождается интенсивными электромагнитными излучениями (Рис. 2.17)

Источниками электромагнитного излучения могут быть:

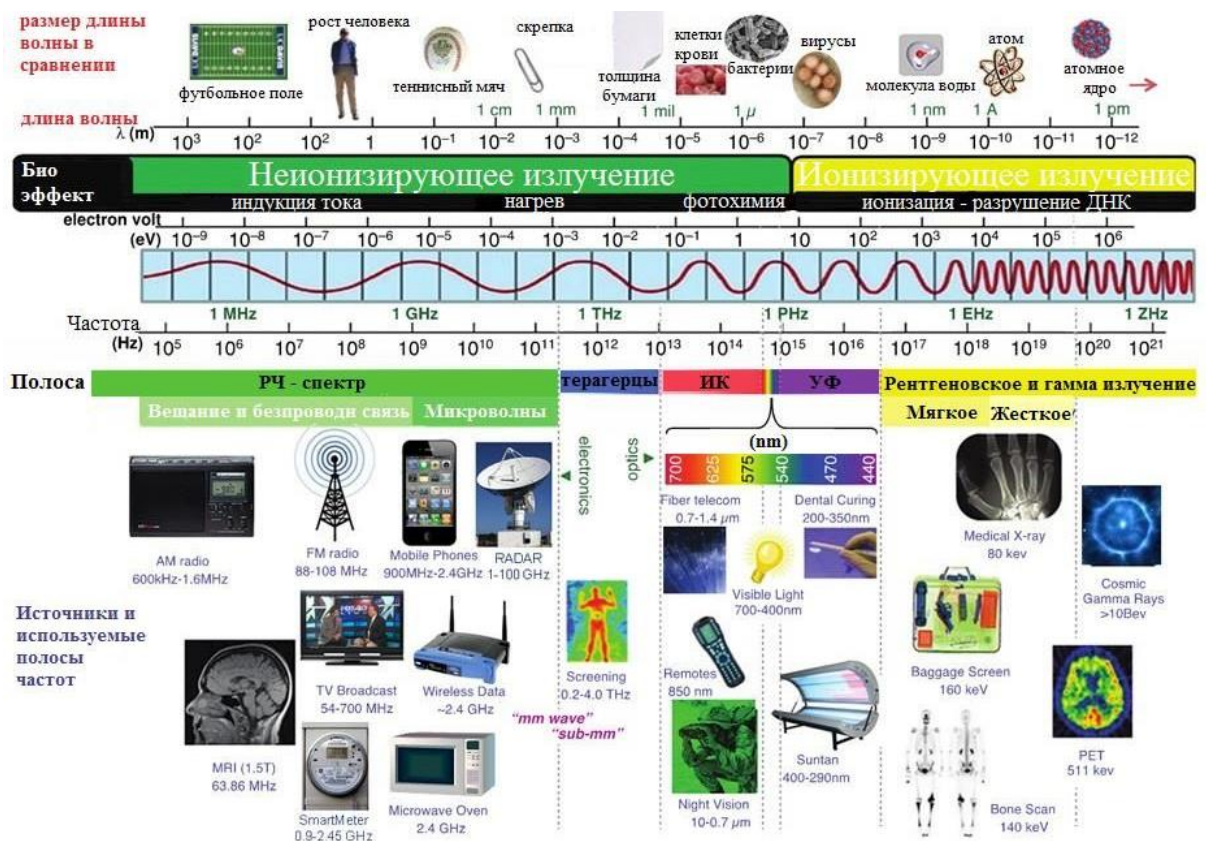


Рис. 2.17 - Диапазоны электромагнитных излучений, опасных для человека

1) Все генераторы и усилители высоких (ВЧ) и сверхвысоких (СВЧ) частот<sup>10</sup>, в том числе теле- и радиостанции, спутниковая и сотовая связь, радары, СВЧ-печи, многообразная медицинская аппаратура, персональные компьютеры, линии электропередач и т.п.

2) Провода с ВЧ и СВЧ токами и в том числе антенно-фидерные устройства.

<sup>10</sup> Низкочастотные (НЧ) сигналы слабо влияют на человека. Они создают магнитное и электромагнитное поля, которые быстро затухают при удалении от источника. ВЧ и СВЧ поля на расстоянии затухают слабо. Возникающие электромагнитные волны передаются на большие расстояния и могут оказывать вредное влияние на соседние ЭРЭ и человека.

3) Все генераторы импульсных сигналов (импульсный сигнал содержит широкий спектр частотных составляющих).

4) Провода с импульсными токами.

5) Все устройства, работа которых связана с включением и выключением цепей под током.

6) Все устройства, работа которых связана с искрением на контактах. Искра на щётках двигателя имеет малую длительность, а значит широкий спектр частот.

7) Все устройства и провода с высоковольтными токами, напряжениями, на острых кромках которых может быть стекание заряда (коронный разряд).

Чувствительными к электромагнитным излучениям (приёмниками излучений) могут быть:

- все усилители, и в особенности их входные цепи;
- нагрузка ВЧ усилителей;
- ВЧ дроссели, все катушки индуктивности;
- люди и животные.

В зависимости от уровня, электромагнитные излучения могут губительно действовать на живые клетки в диапазоне частот  $f = 60$  кГц .. 300 ГГц. В нижней части диапазона от 60 кГц до 300 МГц электромагнитные излучения измеряют и оценивают уровнем напряжённости электрических и магнитных полей. Таблица 2.26 знакомит с максимально-допустимыми значениями напряжённости  $E$  электрического поля.

Таблица 2.26 – Максимально-допустимые значения напряжённости  $E$  электрического поля для различных частот  $f$

$f$ , МГц	0,06 .. 3	3 .. 30	30 .. 50	50 .. 300
$E$ , В/м	50	20	10	5

В СВЧ диапазоне от 300 МГц до 300 ГГц электромагнитные излучения особенно опасны, и оцениваются уровнем удельной мощности излучения на единицу поверхности Руд, измеряемой в Вт/м<sup>2</sup>.

Допустимый уровень в СВЧ диапазоне Руд = 0,1 Вт/м<sup>2</sup>. Допустимые уровни излучения базовых станций мобильной связи (900 и 1800 МГц) в России 10 мкВт/см<sup>2</sup>.

Работами российских и зарубежных учёных было установлено, что наиболее чувствительными к воздействию электромагнитных полей являются мозг и нервная система человека. Электромагнитные излучения вызывают или усугубляют тяжёлые заболевания сердечно-сосудистой, эндокринной, половой, иммунной и нервной систем человека. Среди таких болезней рак мозга и лимфатических узлов, агрессивный рост лейкозных клеток (лейкемия), повреждение ДНК, повышенное кровяное давление, депрессии (с суицидальными наклонностями), болезнь Альцгеймера и др. Особенно опасны электромагнитные излучения для здоровья детей и беременных женщин.

Организационные, инженерно-технические и лечебно-профилактические защитные мероприятия от воздействия электромагнитных полей РЭС должны обеспечиваться с учё-

том новейших достижений науки и техники ещё на стадии их проектирования. Это и безопасное размещение излучающих объектов относительно облучаемых, и использование коллективных (населённый пункт, район, группа домов), локальных (отдельное строение, помещение) и индивидуальных (в особенности людей с имплантированными кардиостимуляторами) средств.

Для обеспечения электромагнитной совместимости между источниками и приёмниками излучений необходимо ослабить связи между ними до допустимых значений [45]. Рекомендуется:

- пространственное разнесение источников или приёмников излучений;
- тщательное экранирование источников и приёмников излучений [46,47];
- установка фильтров в общие цепи источника питания, приёмников помех.

Качество экранирования существенно уменьшается, если в экране есть отверстия или прорезы. Прорезы, щели, окна и вентиляционные отверстия в металлических корпусах, кожухах РЭС могут излучать на высших гармонических составляющих рабочего сигнала, особенно если вентиляционные прорезы неправильно сориентированы относительно направления напряжённости паразитного магнитного поля. В конструкции необходимо обеспечить целостность экранирования кожухом или корпусом, устранив щели с помощью резиновой прокладки в экранирующей оплётке или резиновой прокладкой из токопроводящей резины. Вентиляционные окна на металлическом кожухе экранируют с помощью металлических сеток.

#### 2.1.8 Анализ эстетических и эргономических показателей конструкции

Существенную роль при покупательской оценке РЭС во многом играют эстетические и эргономические показатели их дизайна, отвечающие физиологическим и социальным требованиям пользователя.

**Эстетические показатели** характеризуют художественное единство формы и содержания РЭС и обуславливают характер построения и компоновки РЭС (композиционную целостность, масштабную соразмерность элементов конструкции между собой, зоны оптимального размещения органов управления и других внешних установочных элементов и т.п.) [48,20].

Красивые РЭС украшают помещение и улучшают настроение работающих с ними людей. Особенно важно требование красивого внешнего вида при создании бытовых РЭС, которые должны не только органически вписываться в интерьер помещения, но и украшать его.

Взаимосвязь важнейших элементов конструкции РЭС, выражающая замысел конструктора, определяется его **композицией**.

Красота конструкции РЭС характеризуется рядом частных показателей, к которым относятся:

- **гармоничность** (свойство формы конструкции быть органично согласованной с элементами формы, что достигается определённым соотношением размеров, форм, яркости, цвета, расположения отдельных элементов);



- **выразительность** (способность конструкции своим внешним видом наглядно отображать качество, обеспечивая соответствующее эстетическое восприятие);
- **оригинальность** (совокупность своеобразных элементов формы и их отношений, позволяющая отличить данную конструкцию от однотипных),
- **стилевое единство** (устойчивая общность формально-художественных средств, отражающая исторически сложившиеся социально-экономические и идейно-эстетические принципы, а также художественно-конструкторские методы и средства их воплощения);
- **современность стиля** (согласованность между общим стилем конструкции и лучшими образцами мировой культуры).

**Эргономика конструкции.** Под эргономичностью понимают согласованность конструкции с возможностями и особенностями человека оператора [49].

**Эргономические характеристики** пользователя РЭС устанавливаются с целью оптимизации его деятельности.

**Антропометрические** характеристики учитывают согласованность параметров конструкции с физическими особенностями (антропометрии) человека - размерами его тела, возможности обзора внешнего пространства, положения оператора при работе и т.п.

Исходя из антропометрических требований, определяются допустимые значения массы устройств и их форма. Например, при проектировании пультов управления должны выполняться требования по форме и размерам с учётом позы оператора. Для снятия нагрузки с рук оператора предлагается столешница на высоте 750 мм. Чтобы угол зрения на передней панели был прямым, передняя панель должна быть наклонена на 60° к горизонту. Для компактных, миниатюрных приборов гоже рекомендуется выполнять переднюю панель наклонно. Чтобы исключить сканирование головой оператора сверху вниз размер по высоте передней панели не должен быть более 500 мм. Кроме того, панель ограничивают по ширине, заворачивая её вправо и влево так, чтобы доставала рука оператора.

**Сенсомоторные** характеристики учитывают скорость реакции человека по скорости восприятия информации и быстродействию его сенсорных реакций на различные виды раздражителей.

Скорость считывания информации на индикаторных устройствах зависит от смыслового содержания информации. Если информация смысловая, т.е. имеет логику, то скорость её восприятия человеком может достигать 15-20 бит/с. Если информация смысла не имеет (например, зашифрованная), то скорость восприятия значительно меньше - не более 2-4 бит/с.

**Психофизиологические** характеристики учитывают скорость и темп движений частей тела, характеристики зрения, реакцию человека на цвет, цветовую гамму, частотный диапазон подаваемых сигналов, форму и другие эстетические параметры. Эти показатели необходимо учитывать при выборе конструкции элементов управления (ручек, кнопок, тумблеров). Необходимо соблюдать согласованность по быстродействию, освещённости, размерам и форме, комфортности. Исходя из требований психофизиологии, частота кадровой развёртки ЭЛТ должна быть не менее 24 кадров в секунду, т.е. больше 24 Гц.

Следует подобрать, материалы и варианты цветовых решений покрытий, определяющие дизайн и совместимость проектируемой РЭС с объектом установки.

**Биомеханические** характеристики учитывают силовые возможности человека при определении усилий, прилагаемых к органам управления.

При эргономическом планировании конструкции РЭС следует предусмотреть:

- расположение органов управления и индикации, обеспечивающее удобное положение человека при работе и оптимальное расстояние до глаз;
- размещение соответствующих органов управления и индикации в последовательности, соответствующей порядку выполнения операций и достаточно друг от друга, чтобы возможно быстро управлять ситуацией;
- соответствие формы, размеров и материалов органов управления прилагаемому усилию, допустимость их с точки зрения физиологии различных операторов (мужчин, женщин, молодых и пожилых работников);
- удобство обслуживания и ремонта РЭС.

Художественно-конструкторское решение только тогда признается соответствующим требованиям технической эстетики, если оно обладает художественной и информационной выразительностью, целостностью композиции, рациональностью формы (удовлетворяет эксплуатационным, конструктивным и технологическим требованиям, соответствует требованиям эргономики).

Удобство эксплуатации обеспечивается рациональной компоновкой органов управления, органов отображения информации. В зависимости от сложности устройства бывают варианты компоновки с централизованным и децентрализованным управлением. Централизованная система предполагает компоновку органов управления и отображения информации отдельным пультом управления. В случае децентрализованного управления органы управления компонуются непосредственно на передних панелях. Удобство эксплуатации во многом определяется компоновкой передней панели.

На передней панели размещают органы отображения информации, органы управления и контроля. В качестве устройства отображения информации используются ЭЛТ, индикаторы цифровые, стрелочные приборы, шкалы настройки, световая сигнализация. Устройства отображения информации компонуют в верхней части с тем, чтобы их не закрывать рукой при работе оператора. Устройства управления рекомендуется размещать справа или снизу непосредственно под устройством отображения информации. Кроме того, на передней панели размещают устройства контроля: сигнальные лампочки накаливания, лампочки тлеющего разряда (неоновые), светодиоды, колодки контроля или гнезда для контроля работоспособности внешними устройствами. Для удобства эксплуатации все органы на передней панели должны иметь надписи о назначении и предельных положениях.

Надписи выполняются буквами либо символами. Они могут выполняться гравировкой и затем затираться краской, контрастной к цвету панели. Для удобства управления особенно в условиях ограниченной видимости должны выполняться следующие общепринятые положения: положению «Вкл.», «Пуск», увеличению регулируемого параметра соответствует положение ручки вверх или вправо, или вращение по часовой стрелке.

Положению «Выкл.», «Стоп», уменьшению регулируемого параметра соответствует положение ручки вниз или влево, или вращение ручки против часовой стрелки.

При эксплуатации в условиях ограниченной видимости предлагается подсветка органов передней панели. Площадь передней панели ограничена, а поэтому должны предлагаться следующие методы минимизации по площади:

1. Уменьшают габаритные размеры и площади под устройствами отображения информации за счёт их многофункциональности. Для того чтобы вести в приборах не только количественную, но и качественную оценку параметров можно разделить шкалы приборов на секторы разной цветности, или ввести световую сигнализацию аварийных уровней.

2. Сокращают количество органов управления и упрощают работу с ними за счёт замены органов управления кнопками. Это возможно, если предлагать устройства многоканальные с фиксированной настройкой частоты.

Подстройка же по частоте, по усилению выполняется, автоматизировано за счёт схемотехнических решений.

Ручки управления на органы управления могут быть стандартными (стандартные ручки различных форм предназначены на различные усилия). В зависимости от усилия управления ручки могут быть: цилиндрические, типа клювик, цилиндрические рифлёные, ручки типа ворота на большие нагрузки.

Органы управления и ручки к ним должны выбираться на усилие управления при ударах и вибрациях. При механических воздействиях дополнительно возникают силы инерции равные произведению массы управляющего элемента на величину ускорения.

**Уровень пользования.** РЭС должно быть спроектировано так, чтобы для его управления не требовался исключительно высококвалифицированный персонал. Случайное неправильное обращение с органами управления не должно выводить РЭС из строя. Субъективные особенности обслуживающего персонала не должны сказываться на результатах операций, которые выполняет РЭС.

**Ремонтопригодность.** Обслуживание РЭС (периодические профилактические и ремонтные работы) должно быть простым. Для этого должны быть обеспечены:

- удобный монтаж и демонтаж РЭС и её составных частей;
- лёгкий доступ к узлам и блокам, требующим периодического осмотра, подстройки, очистки и смазки;
- возможность быстрой смены узлов и блоков, обладающих маленьким сроком службы;
- взаимозаменяемость (унификация) блоков и узлов по электрическим и механическим параметрам.

Всякое ремонтнопригодное РЭС целесообразно комплектовать запасными частями для быстрого восстановления работоспособности после выхода его из строя.

#### 2.1.9 Техничко-экономические показатели

Каждое РЭС должен быть сконструировано так, чтобы затраты на его производство и эксплуатацию (затраты на проектирование и изготовление, стоимость электроэнергии, заработной платы обслуживающего персонала, стоимость запасных деталей, узлов и приборов, необходимых для проведения ремонтных работ и т.п.) были минимальными.

Ускорить и удешевить проектно-конструкторские работы можно как за счёт максимального использования стандартизации - обоснованного применения типовых базовых конструкций и решений, высокой технологичности изготовления, так и путём разработки и внедрения прогрессивных методов проектирования на основе информационных технологий. Оптимизация конструкции РЭС сводится к нахождению из множества допустимых вариантов единственного, обеспечивающего выполнение поставленной задачи с максимальной эффективностью при минимуме затрат.

Применение информационных технологий проектирования РЭС изменяет многие этапы работ и требует перестройки традиционно сложившихся отношений между проектировщиками, конструкторами, технологами, переходу к безбумажной технологии. Число людей, занятых в сфере проектирования и производства РЭС неуклонно снижается, что положительно сказывается на себестоимости последних. Одновременно возрастают требования к квалификации разработчиков.

Особую роль в настоящее время приобретает экономичное питание РЭС. Действительно, бурный количественный рост электронной бытовой техники у населения требует для своего питания мощности, значительно превышающей рост энергетических ресурсов. Заметим, что уменьшение потребления электроэнергии в РЭС с батарейным питанием позволяет снизить его массу за счёт уменьшения габаритов источников питания или при той же массе батарей продлить срок службы РЭС. Таким образом, задача энергосбережения приобретает для проектировщика РЭС первостепенное значение.

Технический и экономический уровни будущей конструкции РЭС могут быть оценены путём сопоставления его показателей с показателями лучших отечественных и зарубежных аналогов РЭС того же эксплуатационного назначения.

### 3 Список литературы

1. ГОСТ Р 51623-2000 Конструкции базовые несущие радиоэлектронных средств. Система построения и координационные размеры. - М.: Госстандарт России, 2000. - 12 с.
2. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М.: Стандартиформ, 2013. - 85 с.
3. ГОСТ 16019-2001 - Аппаратура сухопутной подвижной радиосвязи. Требования по стойкости к воздействию механических и климатических факторов и методы испытаний (взамен ГОСТ 16019-78). - Минск: Стандартиформ, 2002 – 10 с.
4. Уваров А.С. P-CAD. Проектирование и конструирование электронных устройств. - М.: Горячая линия - Телеком, 2004. - 760 с.
5. Стешенко В.Б. P-CAD. Технология проектирования печатных плат. — СПб: БХВ-Петербург, 2003. - 720 с.
6. Саврушев Э.Ц. P-CAD 2006. Руководство схемотехника, администратора библиотек, конструктора. — М.: ООО «Бином-Пресс», 2007 — 768 с.
7. Уваров А.С. Программа P-CAD. Электронное моделирование. - М.: Диалог-МИФИ, 2008. - 192 с.
8. Лопаткин А.В. P-CAD 2004. - СПб : БХВ-Петербург, 2006. - 560 с.
9. Иванова Н.Ю., Петров А.С., Поляков В.И., Романова Е.Б.. Технология проектирования печатных плат в САПР P-CAD-2006: Учебное пособие. - СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. - 168 с.
10. Сабунин А.Е. Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств. - М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. - 432 с.
11. Суходольский В.Ю.. Сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах в САПР Altium Designer 6.: Учебное пособие. Часть 1. - СПб: СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2008. - 152 с.
12. Суходольский В.Ю. Сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах в САПР Altium Designer 6.: Учебное пособие. Часть 2. - СПб: СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 2009. - 108 с.
13. Большаков В.П., Бочков А.Л., Сергеев А.А. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex. - СПб: Питер, 2011. - 336 с.
14. КОМПАС-3D V14. Больше чем CAD // Компания "Аскон". URL: <http://ascon.ru/>
15. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин (взамен ГОСТ 8.417-81). – М. : Стандартиформ, 2003. – 24 с.
16. Кофанов Ю.Н., Сарафанов А.В., Трегубов С.И. Автоматизация проектирования РЭС. Топологическое проектирование печатных плат: Учеб. Пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2002. - 220 с.

17. Сарафанов. Основы проектирования электронных средств: Техническое задание. Формирование и анализ: учеб. пособие / А. В. Сарафанов, С. И. Трегубов. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2008. – 140 с.
18. ГОСТ 27.003-90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. - М.: Стандартиформ, 2007. - 20 с.
19. ГОСТ 25804.2-83 Аппаратура, приборы, устройства и оборудование систем управления технологическими процессами атомных электростанций. Требования по надежности. - М.: Стандартиформ, - 1983. -25 с.
20. Кольтюков Н.А. Основы эргономики и дизайна РЭС: учебное пособие по курсовому проектированию / Н.А. Кольтюков. О.А. Белоусов. - Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. - 124 с.
21. Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. - Смоленск: Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. - 617 с.
22. Гелль П.П., Иванов-Осипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация РЭА. - Л.: Энергоатомиздат, 1984. - 536 с.
23. Каленкович Н.И. Радиоэлектронная аппаратура и основы её конструкторского проектирования: учебно-методическое пособие для студентов спец. «Моделирование и компьютерное проектирование» и «Проектирование и производство РЭС». - Минск: БГУИР, 2008. - 200 с.
24. Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. - М.: Энергия, 1968. - 359 с.
25. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Советское радио, 1976. - 230 с.
26. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Ч. Т. Романычева, А. К. Иванова, А. С. Куликов и др; Под ред. Э.Т. Романычевой. - 2-е изд., перераб. и доп. -М.: Радио и связь, 1989. - 448 с.
27. Криваткин А., Сакуненко Ю. Применение теплорассеивающих пластмасс для охлаждения LED-кристаллов // Время электроники. URL: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2327/doc/53280/>
28. Алямовский. COSMOSWorks. Основы расчёта конструкций на прочность в среде SolidWorks. - М.: ДМК Пресс, 2010. - 784 с.
29. Алямовский А. А. и др.. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / Авторы: Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В., Харитонович А. И., Пономарев Н. Б.. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 800 с.
30. Шалумов А.С., Малютин Н.В., Кофанов Ю.Н., Способ Д.А., Жадное В.В., Носков В.Н., Ваченко А.С. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. Том I/ Под ред. Кофанова Ю.Н. - М.: Энергоатомиздат, 2007. - 368 с.

31. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справ, пособие. - М. : Машиностроение-1, 2004. - 512 с.
32. ГОСТ 9.039-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы. – М. : Изд-во стандартов, 1991. - 49 с.
33. ГОСТ 23752-79. Платы печатные. Общие технические условия. - М.: Издательство стандартов, 1991. - 34 с.
34. Белоусов О.А., Кольтюков Н.А., Грибков А.Н. Основные конструкторские расчеты в РЭС : учебное пособие / О.А. Белоусов, Н.А. Кольтюков, А.Н. Грибков. - Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, , 2007. - 84 с.
35. Глудкин О.П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС: Учеб. для вузов. - М.: Высш. шк., 1991. - 336 с.
36. Мырлова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. - М.: Радио и связь, 1988. - 296 с.
37. Рябов Ю.Г. Общие положения по сохранению живучести и обеспечению защиты радиоэлектронных средств от воздействий электромагнитного оружия и электронного терроризма // Специальные радиосистемы. URL: <http://www.radioscanner.ru/info/article144/>
38. ГОСТ 25467-82. Изделия электронной техники. Классификация по условиям применения и требования по стойкости к внешним воздействующим факторам. - М.: Изд-во стандартов, 1987. - 105 с.
39. Кольтюков Н.А. Проектирование несущих конструкции радиоэлектронных средств : учебное пособие / Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. - Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. - 84 с.
40. Князев А.Д. и др. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. — М.: Радио и связь, 1989. — 224 с.
41. ГОСТ 11478-88. Аппаратура радиоэлектронная бытовая. Нормы и методы испытания на воздействие внешних механических и климатических факторов. – М.: Издательство стандартов, 2013. – 44 с.
42. Межгосударственный стандарт ГОСТ 14254-96 (МЭК 529-89). Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP). Взамен ГОСТ 14254-80. - М.: Стандартиформ, 2008. - 36 с.
43. Фирма "ПРОМСАТ", г. Киев, "Степени защиты: IP и NEMA," *ПуКАД*, Apr 2004. pp. 56, 57.
44. Описание стандарта MIL-STD 810 [Электронный ресурс] // Сайт компании ЗАО «РАДИАНТ-ЭЛКОМ»: [сайт]. [2014]. URL: <http://www.radiant.su/rus/articles/?action=show&id=101>

45. А.Д. Князев, Л.Н. Кечиев, Б.В. Петров. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. - М.: Радио и связь, 1989.— 224 с.
46. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Советское радио, 1979. - 216 с.
47. Н.А. Кольтюков, О.А. Белоусов. Экранирование в конструкциях РЭС: метод. указ. - Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та , 2007. - 16 с.
48. Варламов, Р.Г. и др.. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования. — М.: Сов. радио, 1980. — 480 с.
49. Мунипов В.М., Зинченко В.П. Эргономика: человекоориентированное проектирование техники, программных средств и среды: Учебник. - М.: Логос, 2001. - 356 с.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А. Бланк индивидуального задания

### МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования

### ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра конструирования и технологии производства  
радиотехнических средств (КИПР)

### ЗАДАНИЕ

на курсовой проект по дисциплине «Автоматизированное проектирование  
радиоэлектронных средств»

Студенту (ке) \_\_\_\_\_ группы \_\_\_\_\_ РКФ

1. Тема проекта \_\_\_\_\_

2. Срок сдачи студентом законченной работы « » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

3. Исходные данные:

3.1. [Библиографический (ие) источник(и) со схемой электрической принципиальной изделия с описанием работы, указанием типов электрорадиоэлементов (ЭРЭ) и их параметров]

3.2. \_\_\_\_\_

4. Этапы работы:

- 1) Анализ задания и разработка технических предложений (анализ работы устройства, условий эксплуатации и элементной базы, возможных вариантов конструкции проектируемого устройства, уточнение элементной базы и т.п.).
- 2) Составление технического задания на проектирование устройства.
- 3) Подготовка к проектированию (выделение схемы электрической принципиальной печатного узла (ПУ), способов его коммутации и крепления).
- 4) Выбор технологии изготовления печатной платы (ПП), определение её начальных размеров, конфигурации и способа крепления.
- 5) Проектирование корпуса устройства (Solid Works).
- 6) Определение способов установки ЭРЭ на ПП.
- 7) Расчёт надёжности и разработка защиты от дестабилизирующих факторов (климатических, механических и т.п.).
- 8) Автоматизированное проектирование ПП и печатного узла (ПУ) с использованием САПР Altium Designer (P-CAD), Компас и т.п.
- 9) Разработка комплекта документации и пояснительной записки в соответствии с ЕСКД.

## 10) Защита проекта.

**5. Рекомендуемый состав пояснительной записки:**

- 1) Титульный лист;
- 2) Реферат;
- 3) Задание на курсовой проект;
- 4) Содержание;
- 5) Техническое задание;
- 6) Введение (цель работы, область применения разрабатываемого устройства, актуальность разработки, его научное и техническое значение, выбор и характеристика применяемых для проектирования САПР);
- 7) Анализ технического задания и разработка технических предложений;
- 8) Выбор элементной базы (проверка ограничений, оптимизация, определение способов установки, разработка библиотек для автоматизированного проектирования);
- 9) Проектирование конструкции устройства с необходимыми расчётами (массогабаритные показатели, надёжность, тепловой расчёт, защита от дестабилизирующих воздействий);
- 10) Разработка схемы электрической принципиальной и перечня элементов;
- 11) Проектирование печатной платы (ПП) и печатного узла (ПУ) (с необходимыми расчётами);
- 12) Заключение (выводы по результатам проектирования, оценка полноты и качества решения поставленной задачи, рекомендации по конкретному использованию результатов проектирования).

**6. Рекомендуемый комплект документации**

- 1) Исходная схема электрическая принципиальная устройства;
- 2) Исходная схема электрическая принципиальная ПУ с перечнем элементов;
- 3) Чертёж детали ПП (со слоями шелкографии, маски);
- 4) Сборочный чертёж ПУ со спецификацией;
- 5) Сборочный чертёж устройства со спецификацией;
- 6) Чертёж общего вида устройства.

**7. Рекомендуемая литература:**

1. **Кобрин, Ю.П.** Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств: Методические указания по курсовому и дипломному проектированию для студентов очного и заочного обучения специальностей 211000.62 и 162107.65. - Томск, ТУСУР, 2012. - 140 с. URL: <http://edu.tusur.ru/training/publications/2615>
2. **Сабунин А.Е.** Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств. — М: СОЛОМ-ПРЕСС, 2009. — 432 с.
3. **Уваров А.С.** P-CAD. Проектирование и конструирование электронных устройств. - М.: «Горячая линия-Телеком», 2004. - 760 с.
4. **Каленкович Н.И.** Радиоэлектронная аппаратура и основы её конструкторского проектирования. - Минск: БГУИР, 2008. - 200 с.
5. Белоусов О.А. Основные конструкторские расчёты в РЭС: учебное пособие / О.А Белоусов. НА. Кольтюков, А.Н. Грибков. - Тамбов Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. 2007. - 84 с.
6. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Э.Т. Романычева, А.К. Иванова, А.С. Куликов и др.; Под ред. Э.Т. Романычевой. — М.; Радио и связь, 1989. — 448 с.: ил.
7. ОС ТУСУР 01- 2013. Образовательный стандарт ВУЗа. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления. — Томск: ТУСУР, 2013. — 57 с.
8. \_\_\_\_\_

8. Дата выдачи задания

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

9. Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

Руководитель

\_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ /

